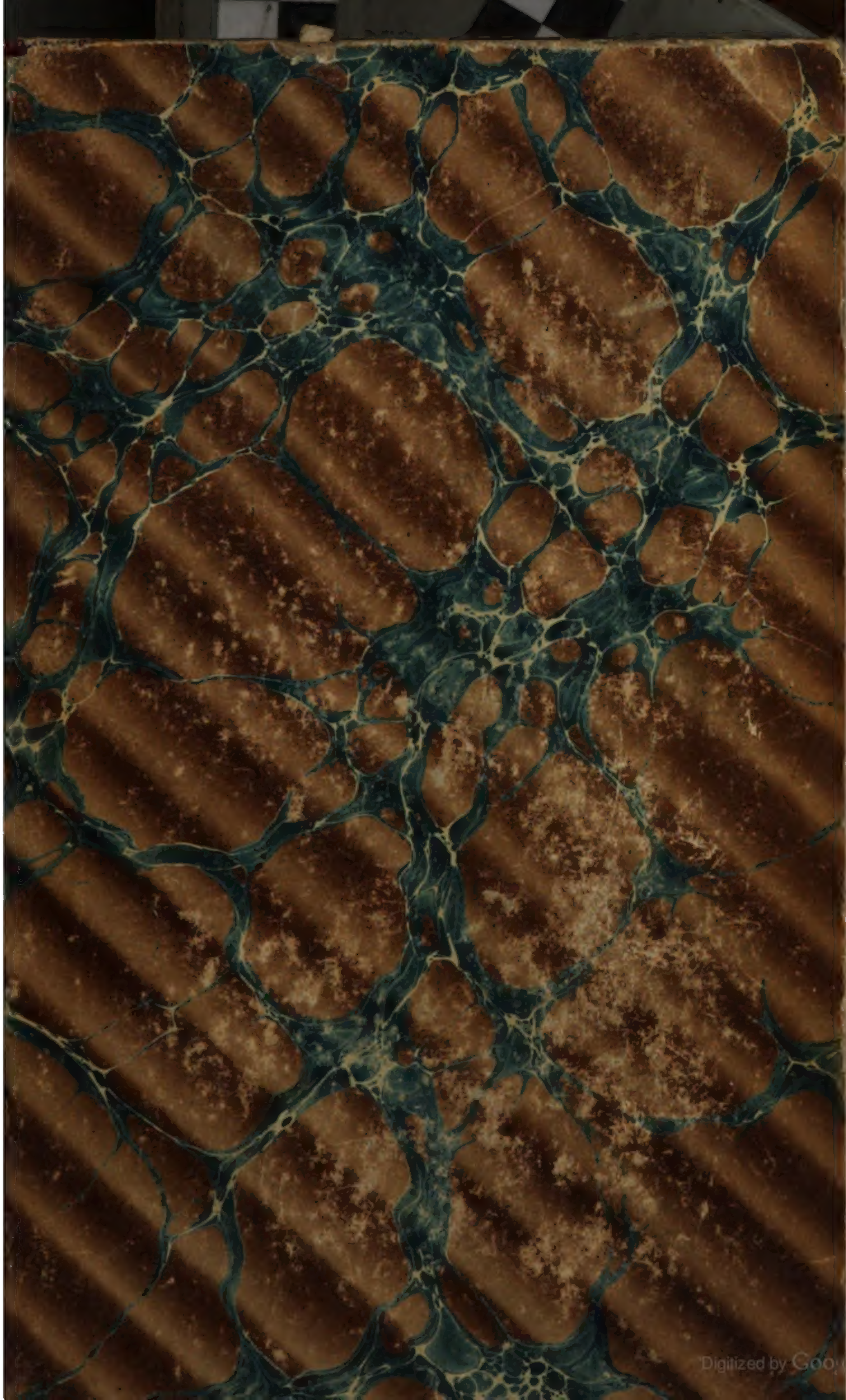


TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE

PAR

A. PRIVAT DESCHANEL

ANCIEN PROFESSEUR DE PHYSIQUE AU LYCÉE LOUIS-LE-GRAND
INSPECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS

Ouvrage accompagné de 719 figures

DESSINÉES

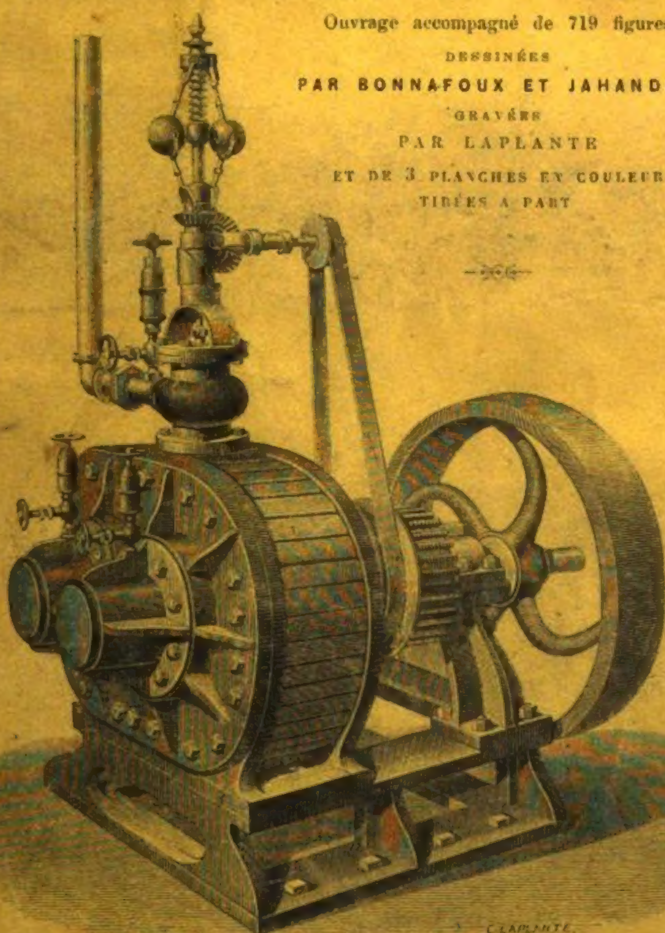
PAR BONNAFOUX ET JAHANDIER

GRAVÉES

PAR LAPLANTE

ET DE 3 PLANCHES EN COULEUR

TIRÉES A PART



LIBRAIRIE L. HACHETTE ET Cie

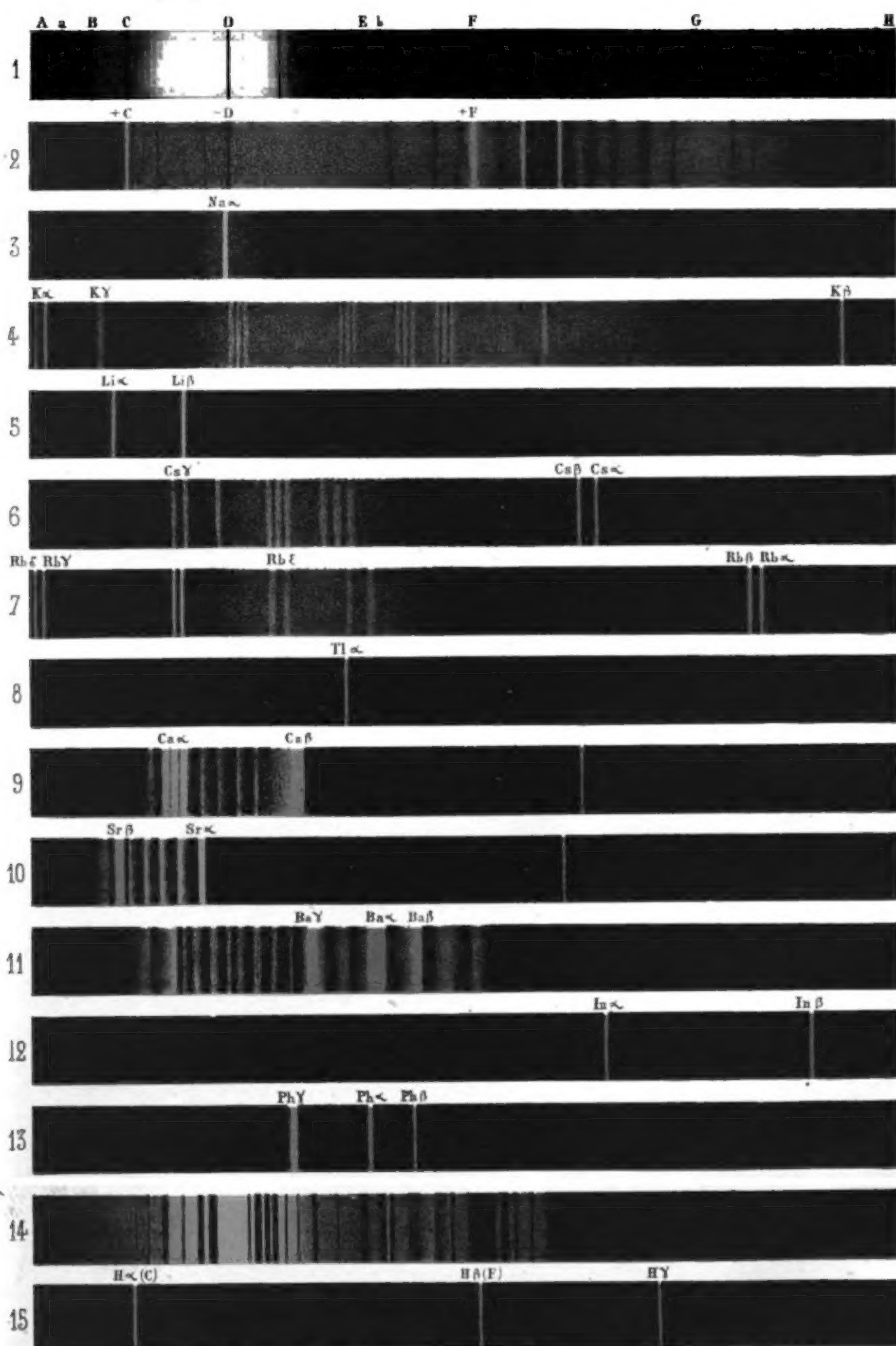
77, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE


IMPRIMERIE J. CLAYE
RUE SAINT BENOIT 7
PARIS



SPECTRES
DE DIVERSES SOURCES LUMINEUSES
(Solaire, Stellaires, Métalliques, Gazeuses.)

[illegible]

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE

PHYSIQUE

PAR

A. PRIVAT DESCHANEL

ANCIEN PROFESSEUR DE PHYSIQUE AU LYCÉE LOUIS-LE-GRAND
INSPECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS

OUVRAGE ACCOMPAGNÉ DE 719 FIGURES

DESSINÉES PAR BONNAFOUX ET JAHANDIER

GRAVÉES PAR LAPLANTE

Et de 5 planches en couleur tirées à part



PARIS

LIBRAIRIE L. HACHETTE ET Cie

77, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 77

1869

PRÉFACE

L'importance de l'étude de la physique est aujourd'hui généralement reconnue; outre l'intérêt de curiosité que doit présenter évidemment l'observation de la nature, il y a dans l'emploi de la méthode expérimentale un exercice des plus salutaires pour l'esprit, et propre à compléter très-utilement le résultat obtenu par l'étude des sciences mathématiques. La méthode de déduction employée, en effet, dans ces dernières, excellente pour développer la rectitude du raisonnement, laisse peut-être un peu trop de côté le point de vue critique, qui joue un si grand rôle dans les sciences physiques. Ici, en effet, il s'agit non pas de tirer rigoureusement les conséquences d'un principe absolu, mais de remonter des conséquences particulières, qui sont seules connues, au principe général d'où elles dérivent. Il n'y a pas pour une telle opération de procédé parfaitement sûr, et on ne peut arriver à une certitude relative que par une discussion qui met très-avantageusement en jeu toutes les fa-

cultés de l'esprit. Quoi qu'il en soit, la physique a pris dans l'enseignement une place considérable, et elle joue un rôle important dans les examens qui conduisent aux différents grades universitaires. Le traité que je publie aujourd'hui est destiné à faciliter le travail des jeunes gens qui veulent obtenir ces grades; j'espère qu'il pourra aussi être lu avec quelque profit par les personnes qui, dans le seul but de leur instruction, voudraient acquérir une connaissance un peu précise des phénomènes naturels. Chargé, depuis près de vingt ans, d'une chaire de physique dans un des lycées de Paris, j'ai dû faire des efforts continuels pour vaincre les difficultés inhérentes à ce genre d'enseignement; j'ai tâché de profiter de cette expérience dans la rédaction de mon livre, et je serais heureux qu'il pût contribuer à propager le goût d'une science utile et intéressante.

Dans l'intérêt des élèves qui se préparent au baccalauréat, j'ai fait suivre ce traité de l'énoncé d'un certain nombre de problèmes dont la plupart ont été donnés comme sujets de composition dans les facultés des sciences de Paris ou des départements; dans le même but, j'ai tâché de n'omettre dans le corps de l'ouvrage aucune des formules qui sont le fondement ordinaire de la résolution de ces sortes de questions. En dehors de ces cas, je n'ai fait qu'un usage restreint de l'algèbre. Bien que le calcul soit un auxiliaire précieux et souvent indispensable de la physique, son utilité varie toutefois suivant les circonstances. Il y a, en effet, des phénomènes dont l'intelligence réelle n'est possible qu'à la condition d'aller jusqu'à la mesure; mais dans beaucoup de cas aussi le méca-

nisme général des phénomènes peut se manifester en dehors même de leur expression numérique; le calcul est alors d'une importance secondaire et, pour ainsi dire, exclusivement pratique.

La physique a pris depuis quelques années un grand développement : les faits se sont multipliés à l'infini, les théories elles-mêmes ont subi de grandes modifications; de là une difficulté réelle à choisir les points les plus essentiels et les plus propres à donner une idée précise de la science. J'ai fait de mon mieux pour résoudre cette difficulté, et j'espère que le lecteur qui aura parcouru attentivement mon ouvrage se trouvera en mesure de se faire une opinion exacte du niveau actuel de la physique; je serais heureux, du reste, de profiter pour une seconde édition des observations qu'on voudrait bien me faire sur ce point aussi bien que sur tous les autres.

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

CHAPITRE PREMIER.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

1. Origines de la physique. — La physique a pour objet l'étude du monde extérieur, des phénomènes qu'il nous présente, des lois qui les régissent, des applications qui peuvent en être faites à nos divers besoins. C'est une branche de la philosophie générale qui, s'occupant exclusivement des faits qui intéressent la matière, a reçu le nom très-expressif et très-heureux de philosophie naturelle (φύσις, nature). Ainsi entendue, la physique doit remonter évidemment à l'origine du monde, car dès que l'homme a existé, il a dû nécessairement être frappé, et par le spectacle du ciel et par le tableau sans cesse renaissant des phénomènes terrestres ; mais des observations isolées et plus ou moins vagues, une admiration stérile pour des phénomènes qui provoquent l'attention ou excitent la curiosité, ne constituent point la science ; celle-ci résulte d'un corps de doctrine précis, dans lequel les faits sont rapprochés les uns des autres et étudiés au point de vue de la cause qui les produit. Ce travail de coordination n'est possible qu'après qu'un ensemble considérable de faits a pu être recueilli ; mais il devient alors inévitable par suite de l'essence même de l'esprit humain. Aussi, en consultant l'histoire des peuples chez lesquels nous plaçons le berceau de notre civilisation, nous constatons les efforts constants des philosophes pour

expliquer le mécanisme du monde extérieur, pour soumettre à une théorie, à un système, l'ensemble des faits que nous présente la nature. Les philosophes grecs, en particulier, qui avaient du reste emprunté la plupart de leurs connaissances physiques aux prêtres égyptiens, nous ont laissé différents systèmes à l'aide desquels ils avaient la prétention d'expliquer tous les phénomènes naturels. Ainsi Thalès, le plus célèbre des sept sages de la Grèce (640 avant J.-C.), faisait de l'eau un principe universel dont se nourrissent à la fois le soleil, la terre et les planètes; Platon (398 avant J.-C.) admettait deux principes distincts, la matière et la forme, qui donnent naissance par leur combinaison à cinq éléments : la terre, l'eau, le feu, l'air et l'éther. Pour Anaximandre il n'y a qu'un principe, c'est l'*infini* qui donne naissance à tous les corps; suivant Anaxagore, c'est l'air qui est le souverain de la nature. Nous n'avons pas à examiner ici la signification exacte de ces propositions, qui, prises dans leur sens littéral, peuvent paraître aujourd'hui assez inintelligibles; tout en reconnaissant d'ailleurs que ces illustres philosophes ont enseigné ou connu quelques faits importants de la physique générale, nous tenons à faire remarquer que dans l'élaboration de leurs systèmes l'expérience ne jouait aucun rôle, que l'observation elle-même n'intervenait que d'une façon secondaire, et que leurs théories étaient de véritables conceptions *à priori*, auxquelles devaient s'accommoder les faits. Il n'y a donc dans leurs travaux rien qui se rapproche de la méthode expérimentale qui sert de fondement à la physique moderne. Cette méthode semble avoir été pressentie par Aristote (383 avant J.-C.), disciple de Platon, d'un génie scientifique bien supérieur à celui de son maître, naturaliste éminent d'ailleurs, dont l'*Histoire des animaux* constitue un monument impérissable. Ainsi pour se rendre compte de la pesanteur de l'air il eut recours à une expérience directe, qui consistait à peser une outre gonflée et dégonflée. Toutefois, n'ayant pas trouvé de différence de poids, il en conclut, à tort, que l'air n'est point pesant, et fut ainsi conduit, pour l'explication de divers phénomènes, au fameux principe de l'aversion de la nature pour le vide, qui fut universellement admis jusqu'au temps de Galilée.

C'est surtout entre les mains d'Archimède (287 avant J.-C.) et

des savants de l'école d'Alexandrie, qui peuvent être considérés comme ses successeurs, que la méthode d'observation scientifique prend un corps précis et donne lieu à d'importants résultats. Tout le monde connaît les admirables découvertes d'Archimède relatives à la théorie du levier, à la détermination des centres de gravité, à la mesure des poids spécifiques effectuée à l'aide du principe qui porte son nom : découvertes nées d'une expérimentation qui n'était sans doute pas très-précise, mais qui, dans l'esprit de l'inventeur, pouvait seule servir de fondement solide à ses méditations. Après lui Hipparque (140 avant J.-C.), par le moyen d'observations persévérantes et méthodiquement dirigées, renouvelle la face de l'astronomie, arrive aux plus brillantes découvertes, parmi lesquelles il convient de citer surtout celle de la précession des équinoxes. Plus tard Ctésibius, Héron, Possidonius, etc., marchant sur les traces de leurs illustres devanciers, agrandirent le domaine des connaissances exactes déjà acquises, et imaginèrent différents appareils plus ou moins ingénieux; c'est au premier de ces savants, paraît-il, qu'est due l'invention des pompes, et chacun sait que la fontaine de Héron se rencontre encore dans tous les cabinets de physique.

Parmi les savants qui se rattachent plus ou moins directement à l'école d'Alexandrie et qui ont enrichi la science de quelque découverte importante, nous citerons seulement Plutarque, qui fit connaître la réfraction de la lumière dans son passage de l'air dans l'eau, et Ptolémée, auteur de travaux importants sur l'optique et la physique céleste, qui constituent pour lui un titre de gloire beaucoup plus solide que le système astronomique auquel il a attaché son nom, et qui n'a eu d'autre effet que de retarder les progrès de la science.

Nous ne pousserons pas plus loin cet aperçu historique, et nous nous bornerons à remarquer qu'à partir du VIIe siècle, époque de la conquête d'Alexandrie par les Arabes et de l'incendie de la célèbre bibliothèque que renfermait cette ville, jusqu'à Galilée (1564), il y a comme une sorte d'interruption dans la marche de la science. Quelques découvertes d'une importance capitale se rapportent toutefois à cette période; telle est, par exemple, celle de la boussole, connue dès le XIIe siècle. Peu de temps avant Galilée, le thermomètre, le microscope et les lunettes avaient pris naissance; mais c'est incon-

testablement à ce savant illustre qu'est due la véritable méthode scientifique, la méthode expérimentale. Ses mémoires sur la chute des corps, le pendule, etc., fournissent d'admirables exemples de la façon dont le physicien doit, à l'aide de l'expérience, interroger la nature. C'est en entrant dans cette voie que la physique s'est définitivement dégagée des préjugés, des principes *à priori* qui avaient jusque-là embarrassé sa marche.

Aujourd'hui, après des découvertes sans nombre qui ont amené dans notre état social une modification profonde, la physique a atteint un degré de perfection très-remarquable ; c'est à la méthode expérimentale qu'est dû ce résultat, c'est en y demeurant fidèle qu'on peut espérer de réaliser de nouveaux progrès.

2. Méthode expérimentale. — La méthode expérimentale est facile à préciser d'une manière générale : elle consiste à observer les faits, au lieu de chercher à les deviner; à examiner avec soin comment les choses se passent, et non point à rechercher comment elles devraient se passer. Elle est donc entièrement exclusive de la métaphysique, qui doit être considérée comme une ennemie redoutable; tout le temps, en effet, que celle-ci a régné, la science est restée dans l'ornière, elle n'en est sortie que lorsque, grâce aux enseignements de Bacon et surtout de Galilée, il a été admis qu'il n'y a de vérité physique que celle qui résulte de l'observation ou de l'expérience.

Dans le langage philosophique, la méthode expérimentale porte le nom de méthode d'*observation* et d'*induction*. De l'observation des faits particuliers elle remonte à la loi générale de leur production, bien différente en cela de la méthode de *déduction* employée en mathématiques, dans laquelle on descend toujours d'un principe certain et absolu aux diverses conséquences qui en dérivent. Entrons à cet égard dans quelques détails.

3. Phénomène. — Loi physique. — Un phénomène est un changement quelconque survenu dans l'état d'un corps ; la chute d'une pierre, l'écoulement de l'eau, la fusion du plomb, la combustion du bois, etc., sont des phénomènes. Quand on étudie les particularités qui se rapportent à des phénomènes d'un même genre, on reconnaît aisément que les diverses circonstances de leur production sont dans une dépendance mutuelle, si bien que si l'une

d'elles vient à varier, les autres éprouvent une variation correspondante. L'expression de ce mode de variation constitue une loi physique.

Quelquefois la loi apparaît d'elle-même sans difficulté par l'observation seule; telle est, par exemple, celle-ci : *Tous les corps abandonnés à eux-mêmes tombent à la surface de la terre.* Mais le plus souvent elle se trouve masquée par des causes perturbatrices dont il faut éliminer autant que possible l'influence. C'est là l'objet de l'expérience. L'expérience diffère de l'observation en ce que le phénomène se produit sous des conditions déterminées et réglées à l'avance par le physicien. Veut-on savoir, par exemple, quelle est la vitesse que la pesanteur imprime aux différents corps, il ne faut pas les faire tomber dans l'air, parce que ce fluide retarde, et d'une manière inégale pour chacun d'eux, le mouvement; il faut opérer dans le vide, et on arrive ainsi à cette loi que l'observation seule n'aurait pu faire découvrir : *La pesanteur imprime à tous les corps la même vitesse.*

On conçoit donc que l'art d'expérimenter, c'est-à-dire de régler les conditions spéciales suivant lesquelles s'accomplissent les phénomènes, et d'en mesurer les éléments constitutifs, est absolument nécessaire au physicien; que c'est dans cette aptitude portée à un degré plus ou moins éminent que consiste véritablement le génie de la physique. Quoi qu'il en soit, remarquons que, la loi générale d'une classe de phénomènes étant connue, l'expression de cette loi devient ce que l'on appelle la cause physique des phénomènes particuliers qu'elle embrasse. Expliquer l'un quelconque d'entre eux revient à montrer qu'il est contenu dans l'énoncé de la loi.

Ainsi, quand une fois on a posé en principe que les volumes des gaz soumis à des pressions différentes varient en raison inverse de ces pressions, on parvient à expliquer une foule de faits dans lesquels intervient l'action d'un gaz dont le volume et la pression peuvent varier simultanément.

Lorsque la loi des phénomènes observés est susceptible d'une expression algébrique, le calcul intervient comme un instrument précieux propre à en faire connaître toutes les conséquences. La vérification expérimentale de ces conséquences constitue une confir-

mation de la loi physique elle-même. A ce point de vue, les méthodes mathématiques sont un auxiliaire puissant de la physique.

4. Théorie physique. — L'énoncé de chacune des lois physiques, le développement rationnel des conséquences qui en dérivent, constituent une théorie physique partielle. L'ensemble des lois qui se rapportent à une même classe de phénomènes forme une théorie physique plus générale ; mais on comprend que ces diverses lois puissent n'être que de simples corollaires d'une loi unique.

La découverte de cette loi unique, quand elle existe, réalise un progrès important dans la physique. C'est ainsi que Newton a rattaché à la loi unique de la gravitation tous les mouvements de notre système planétaire, ainsi que ceux des corps qui tombent à la surface de la terre.

De même les diverses théories partielles de l'optique sont toutes une conséquence rigoureuse des propriétés attribuées à un fluide nommé *éther* qu'on suppose remplir l'espace, et dont les vibrations servent d'intermédiaire à la propagation de la lumière et de la chaleur.

Ce travail de synthèse est du reste peu avancé encore, bien que des efforts très-efficaces dans ce sens aient signalé ces dernières années; mais on doit le considérer comme le véritable objectif de la physique générale, et celle-ci sera arrivée à la perfection lorsqu'on pourra rigoureusement démontrer que tous les agents physiques distincts admis jusqu'à présent ne sont que la transformation d'un seul et même agent primordial.

5. Divisions de la physique générale. — La physique générale comprend l'ensemble de tous les phénomènes du monde extérieur; mais l'accumulation des connaissances acquises sur les diverses parties de ce vaste ensemble en a nécessité le partage en plusieurs branches, qui constituent aujourd'hui des sciences distinctes.

L'*histoire naturelle* se compose de tout ce qui se rapporte aux différents êtres, organisés ou non, qui se rencontrent à la surface du globe; elle se subdivise elle-même en plusieurs parties :

La *zoologie* s'occupe de l'organisation et des mœurs des animaux, de leur classification méthodique et de tous les phénomènes qui ont trait à leur développement et à leur reproduction.

La *botanique* étudie les mêmes questions relativement aux végétaux.

La *minéralogie* a pour objet la description et la classification méthodique des différents corps inorganiques (minéraux) que la nature nous offre, la connaissance des caractères spécifiques qui servent à les distinguer les uns des autres, l'énumération de leurs principales propriétés ainsi que des applications diverses qui peuvent en être faites.

La *géologie* est l'histoire de la terre; elle raconte les diverses révolutions qui ont modifié sa surface et amené finalement sa configuration actuelle, la disposition et la nature des roches qui entrent dans sa constitution, la description des animaux et des végétaux anciens dont les débris fossiles existent encore, et dont plusieurs appartiennent à des types actuellement disparus. Elle est le fondement de l'art de l'ingénieur des mines, et permet à celui-ci de rechercher d'une manière méthodique dans les entrailles du sol les diverses substances, combustibles ou métaux, que nous utilisons pour nos divers besoins.

L'*astronomie* s'occupe des lois du mouvement des astres : grâce au perfectionnement des instruments de mesure, aux progrès des sciences mathématiques et à la découverte de la gravitation universelle, l'astronomie est arrivée à un degré de perfection tel, qu'on peut la ranger dans la catégorie des sciences exactes.

En dehors de l'histoire naturelle et de l'astronomie, il y a lieu de distinguer encore la physique de la chimie. Cette dernière science a en effet pour objet spécial l'étude des phénomènes dans lesquels le corps est profondément altéré dans sa nature intime, où la matière semble se détruire ou du moins se métamorphoser. Qu'on prenne un morceau de soufre, qu'on le chauffe, il fondra; qu'on le frotte avec de la laine, il deviendra susceptible d'attirer les corps légers et présentera les propriétés diverses et curieuses des corps électrisés; mais le soufre n'aura pas perdu son individualité et lorsque les diverses influences auxquelles nous l'avons supposé soumis cesseront d'agir, il se retrouvera avec tous ses caractères primitifs. Le soufre dans ces circonstances a manifesté des phénomènes physiques. Qu'au contraire on porte ce même

corps dans l'intérieur d'un foyer, on le verra *brûler* avec une flamme bleue; au bout de peu de temps il aura entièrement disparu ou du moins il se sera transformé en une substance gazéiforme qui s'est dissipée avec les autres produits de la combustion. Dans ce cas le soufre proprement dit a cessé d'exister, il s'est produit un phénomène chimique.

On peut donc définir la physique proprement dite l'étude des phénomènes qui n'amènent pas dans la nature intime des corps de modification essentielle et permanente. C'est de cette science particulière seulement qu'il sera question dans ce traité.

Remarquons toutefois que les deux ordres de phénomènes sont produits souvent par les mêmes causes, ils sont fréquemment aussi la conséquence nécessaire l'un de l'autre. C'est ainsi qu'en chauffant un corps on le rend plus propre à éprouver des transformations chimiques; réciproquement la conséquence de pareilles transformations est souvent la production d'une grande quantité de chaleur. La physique et la chimie, quoique poursuivant des buts distincts, doivent donc se prêter un mutuel appui. On n'aurait, par exemple, qu'une idée bien incomplète des propriétés de l'électricité si on ignorait les phénomènes chimiques si curieux, et souvent si utiles, qu'elle est capable de produire.

Une remarque analogue s'applique, au surplus, à toutes les branches de la physique générale. Comment séparer, par exemple, la minéralogie de la chimie, lorsqu'il arrive si souvent que le seul moyen de reconnaître un minéral est d'en faire l'analyse chimique D'ailleurs, les substances que le chimiste produit dans son laboratoire ne doivent-elles pas, pour être bien spécifiées, être étudiées au point de vue des caractères extérieurs, de la forme cristalline par exemple, caractère qui est plus proprement du domaine de la minéralogie?

Peut-on davantage établir une démarcation tranchée entre la zoologie et la botanique d'une part, et la physique et la chimie de l'autre? Ne se passe-t-il pas dans le tissu des êtres organisés des réactions chimiques diverses, qui sont un appendice nécessaire des phénomènes vitaux? Les agents physiques ne produisent-ils pas à leur tour des phénomènes très-complexes et de nature à embar-

rasser complétement le physiologiste ou le médecin, s'il n'a pour se guider la connaissance des lois qui régissent l'action de ces agents sur les corps inorganiques?

Enfin, si l'astronomie semble former une science bien distincte réduite à l'étude géométrique ou mécanique des mouvements des corps célestes, ne doit-elle pas recourir à toutes les ressources de la physique, si elle veut arriver à quelques conjectures rationnelles sur la constitution de ces mêmes corps?

Nous pouvons donc dire que toutes les parties de la physique générale se pénètrent mutuellement; elles forment un tout justement appelé du nom de philosophie naturelle. Si on l'a divisé, c'est pour en faciliter l'étude, l'intelligence la plus vaste et la plus active ne pouvant suffire à suivre le développement de ses diverses branches.

CHAPITRE II.

MÉCANIQUE.

6. Principe de l'inertie. — Le principe fondamental de la physique est celui de l'inertie de la matière. L'inertie ne consiste point dans l'inactivité des particules matérielles ni dans l'impossibilité où elles seraient, en agissant les unes sur les autres, de modifier leur état de repos ou de mouvement; car il suffit de jeter un coup d'œil sur la nature pour voir que le repos n'existe nulle part, que le mouvement se modifie et s'altère de mille manières différentes. Le principe de l'inertie est un principe abstrait qui doit être considéré par rapport à un point matériel isolé. Il peut s'énoncer de la manière suivante :

Un point matériel isolé ne peut rien changer à son état de repos ou de mouvement; de sorte que s'il est en repos, il demeurera indéfiniment en repos; s'il est en mouvement, il continuera indéfiniment à se mouvoir suivant la même direction et avec la même vitesse.

Si donc on voit un point matériel en repos entrer en mouvement, ou si l'on constate une modification dans le mouvement d'un point, on dit qu'il y a eu action d'une *force*.

Sans nous préoccuper ici de la question, fort obscure d'ailleurs, de la nature intime des forces, sans chercher à savoir si elles font partie intégrante des corps ou si elles ont une existence distincte, ne les envisageant que dans les effets qu'elles produisent, nous pourrons les définir de la manière suivante :

Une force est toute cause qui tend à entraîner un point matériel suivant une certaine direction et avec une certaine vitesse.

7. Manifestations de l'inertie. — Énoncé comme il vient de

l'être, le principe de l'inertie n'est point susceptible d'une vérification expérimentale. Car nous ne saurions observer un point matériel, qui est une abstraction, et encore moins un point matériel isolé. Le principe de l'inertie est un de ces principes synthétiques et abstraits qui se sont présentés à l'esprit des fondateurs de la mécanique et de Newton en particulier, comme la clef, la raison d'être des caractères multiples et complexes des phénomènes extérieurs. Mais s'il est impossible de vérifier exactement le principe de l'inertie, il est au contraire très-aisé d'en montrer l'influence dans les phénomènes extérieurs, cette influence se réduisant évidemment à la tendance des corps à persévérer dans leur état de repos ou de mouvement.

La persévérance dans le repos se manifeste à l'observation la plus superficielle ; quant à la persévérance dans le mouvement, une étude un peu attentive des faits la fait concevoir avec netteté. Si, par exemple, on fait osciller un pendule, l'amplitude des oscillations décroît de plus en plus et finit, au bout d'un temps plus ou moins long, par devenir nulle. C'est que le pendule éprouve de la part de l'air une résistance due au déplacement successif des particules de ce fluide. En outre, l'axe de suspension frotte sur les appuis qui le supportent, et cette double circonstance a pour résultat de diminuer la vitesse de l'appareil jusqu'à ce qu'elle soit complétement anéantie. Qu'on atténue par des moyens convenables le frottement au point de suspension, qu'on fasse osciller l'appareil dans le vide, et la durée du mouvement s'accroîtra d'une manière sensible.

L'analogie indique évidemment que, s'il était possible de supprimer complétement ces deux causes de destruction de la vitesse du pendule, celui-ci conserverait indéfiniment son même mouvement.

C'est à cette persévérance dans le mouvement que sont dus les effets qui se produisent lorsqu'une voiture ou un convoi de chemin de fer éprouvent un arrêt brusque : les voyageurs sont projetés pour ainsi dire dans le sens du mouvement, en vertu de la vitesse qu'ils possédaient au moment où l'arrêt a eu lieu. Si l'on conçoit que l'on pût trouver un frein assez puissant pour arrêter tout à coup un convoi dans sa marche, les effets d'un arrêt aussi subit seraient identiquement les mêmes que ceux qui résulteraient du choc d'un

autre convoi venant en sens contraire et animé de la même vitesse.

C'est aussi à l'inertie qu'il faut attribuer les chutes souvent si graves qui ont lieu lorsqu'on descend sans précaution d'une voiture et à plus forte raison d'un convoi en marche. En effet, tous les points du corps possèdent un certain mouvement, et les pieds seuls étant réduits à l'immobilité, la tête continue à se mouvoir et se trouve ainsi lancée contre le sol avec une vitesse plus ou moins considérable.

Lorsque, pour emmancher un marteau par exemple, on frappe l'extrémité du manche contre le sol, on utilise l'inertie de la matière. En effet, au moment du choc et de l'arrêt qui en résulte, la tête continue à se mouvoir et finit, au bout de quelques chocs, par s'emmancher complétement.

8. Mécanique. — Les divers phénomènes physiques ne sont au fond que des mouvements; mais à ces mouvements correspondent souvent des manifestations spéciales et qui ont un intérêt propre. Ainsi quand on chauffe un corps solide et qu'on le fond, il est bien certain que l'état liquide résulte d'un déplacement particulier, ou peut-être aussi d'un changement de forme des molécules, c'est-à-dire de circonstances qui se réduisent à des mouvements; mais le corps liquide formé ainsi a acquis des propriétés particulières, et ce sont elles qui intéressent surtout le physicien.

Toutefois on conçoit que les mouvements puissent être considérés en eux-mêmes d'une manière géométrique et en rapport avec les forces qui les produisent; c'est là l'objet d'une science particulière, la mécanique, que l'on doit considérer comme un préliminaire indispensable de la physique. Nous renvoyons le lecteur aux ouvrages spéciaux sur cette matière; toutefois nous donnerons dans ce chapitre l'énoncé de quelques propositions fondamentales, en les appuyant d'explications propres à en faciliter l'intelligence.

9. Éléments de la force. — Le point matériel soumis à l'action de la force s'appelle le *point d'application de la force*. Il tend en vertu de cette action à se mouvoir suivant une certaine direction que l'on appelle la *direction de la force* et qu'on peut représenter géométriquement par une droite aboutissant au point matériel. On conçoit d'ailleurs évidemment que la force agisse avec une certaine intensité variable d'un cas à l'autre. Cette intensité se manifestera, par

exemple, par une vitesse plus ou moins grande du point suivant les circonstances, de sorte qu'à la plus grande vitesse corresponde la plus grande force.

Lorsque deux forces appliquées au même point en repos lui donnent le même mouvement, on peut dire qu'elles sont égales. La réunion d'un certain nombre de forces égales donne lieu à une force multiple, et l'on conçoit ainsi que les intensités des forces puissent être comparées les unes aux autres. Les forces peuvent donc être représentées soit par des nombres, soit par des lignes, en prenant pour unité une certaine force qui est le plus souvent le kilogramme. On figure ordinairement la force par une ligne AF qui indique sa direction, A est son point d'application et la longueur AB représente, suivant une échelle déterminée, son intensité.



Fig. 1.

10. Résultante. — Quand un point matériel ou un système de points est sollicité par un certain nombre de forces, on comprend qu'une force unique de grandeur déterminée et appliquée en un point convenable puisse produire le même effet que l'ensemble des forces données; cette force unique porte le nom de *résultante*. Les forces primitives se nomment des *composantes*.

Ainsi, par exemple, un bateau descendant une rivière, soumis à l'action des roues ou du vent, mais de façon toutefois que son mouvement soit rectiligne, est en réalité soumis à un très-grand nombre de forces qui agissent sur les différents points; il est toutefois évident qu'une force convenable de grandeur et de position pourrait produire le même effet que toutes ces forces.

Il n'arrive pas toujours qu'un système de forces puisse être remplacé par une force unique; mais quand cela a lieu, il est fort important de déterminer la grandeur et la position de cette résultante, car l'étude du mouvement du corps en sera évidemment simplifiée. Voici un cas important où cette détermination se fait aisément.

11. Parallélogramme des forces. — *Si un point matériel* A *est soumis à l'action de deux forces représentées en grandeur et en direction par* AB *et* AC, *il y a une résultante représentée exactement par la diagonale*

AD *du parallélogramme construit sur les grandeurs mêmes des forces.*

On peut rendre sensible expérimentalement l'exactitude de cette proposition fondamentale à l'aide de l'appareil suivant, dû au physicien S'Gravesande. ABCD est un parallélogramme articulé à ses quatre sommets ; aux points B et C sont fixés des cordons qui, passant sur les poulies de renvoi M et N, supportent à leurs extrémités des poids P et P' égaux respectivement à 90 et 60 grammes.

Fig. 2. — Parallélogramme des forces.

Les longueurs des côtés AB et AC sont elles-mêmes proportionnelles aux nombres 90 et 60. Au sommet A on suspend un poids P'' égal à 120 grammes ; on remarque dans ces circonstances

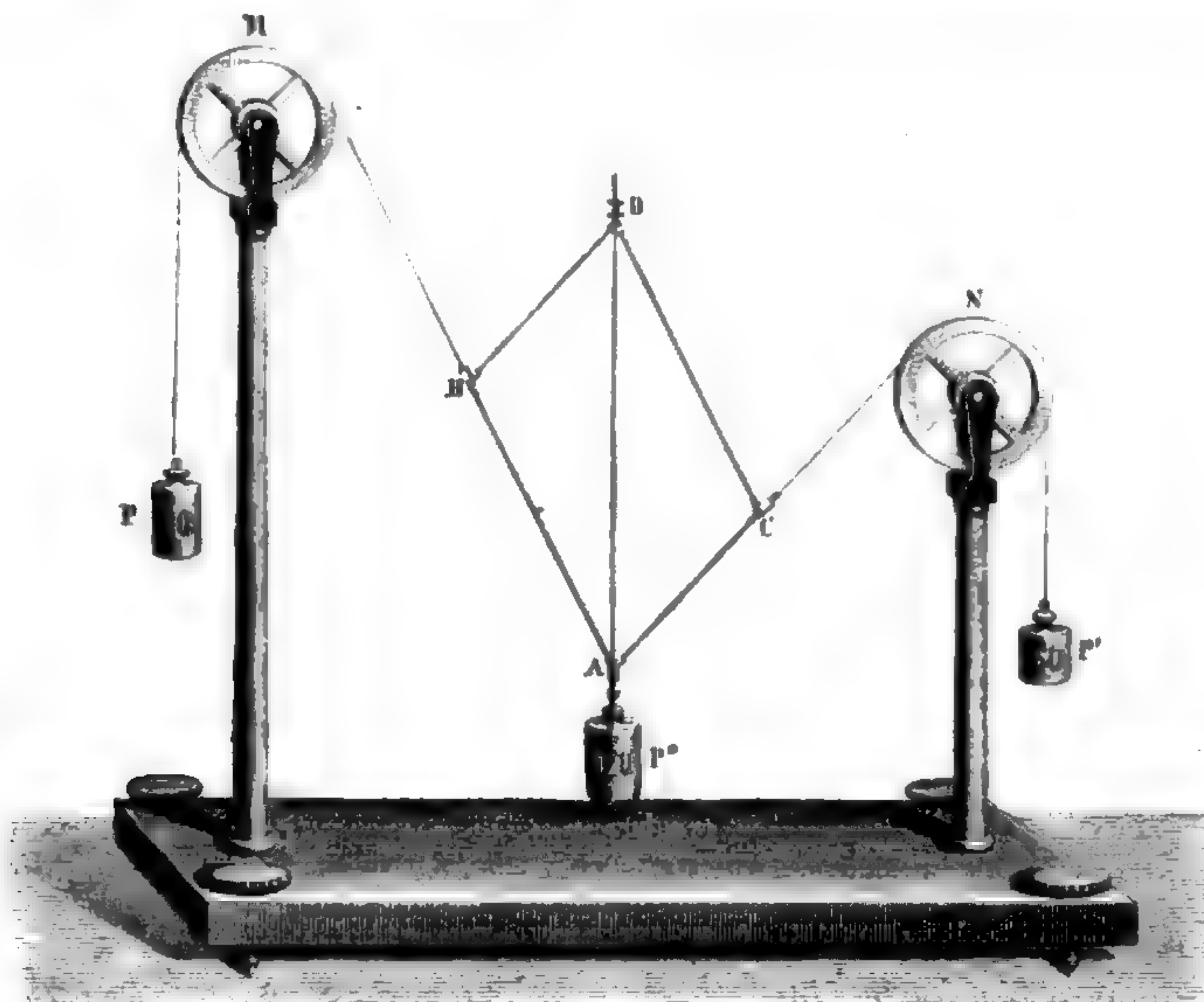


Fig. 3. — Appareil de S'Gravesande.

que le parallélogramme est en équilibre. On constate en outre que les cordons fixés en B et C sont sur le prolongement exact des côtés AB et AC, et qu'une tige verticale fixée en A se trouve précisément concorder avec la diagonale du parallélogramme. Il suit de là que les forces P et P' ont une résultante verticale dirigée suivant la diagonale AD, égale et opposée d'ailleurs à la force P''. Mais cette

dernière a pour valeur 120 grammes, et la longueur de AD mesurée à la même échelle que AB et AC se trouve précisément égale à 120; la résultante est donc exactement égale à la diagonale du parallélogramme construit sur les grandeurs des forces composantes.

12. Composition des forces. — Quand on sait trouver la résultante de deux forces, c'est-à-dire *composer* deux forces appliquées en un même point, on peut aisément en composer un nombre quelconque.

Soient, en effet (fig. 4), quatre forces appliquées au point matériel A : on compose d'abord la force AB avec AC, ce qui donne la résultante Ar; celle-ci, composée avec AD, donne une deuxième résultante partielle Ar', laquelle, composée avec la quatrième force, donne la résultante générale AR.

Dans le cas particulier de trois forces (fig. 5), on voit aisément

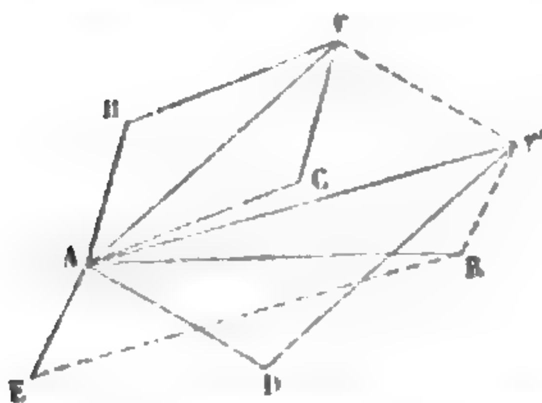


Fig. 4. — Composition d'un nombre quelconque de forces.

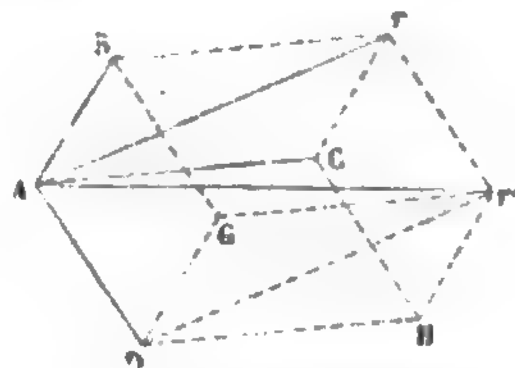


Fig. 5. — Parallélipipède des forces.

que la résultante Ar' n'est autre chose que la diagonale du parallélipipède construit sur les grandeurs AB, AC, AD des trois forces. Dans la figure le parallélipipède a été complété pour que la proposition soit bien claire, mais la construction, tout à fait semblable à la précédente, se réduit à composer AB avec AC et leur résultante Ar avec AD.

13. Composition des forces parallèles. — *Lorsque deux forces parallèles* F *et* F' *sont appliquées aux deux extrémités d'une droite, il y a une résultante* R *égale à leur somme et dont le point d'application* C *partage la droite* AB *en parties inversement proportionnelles aux forces.*

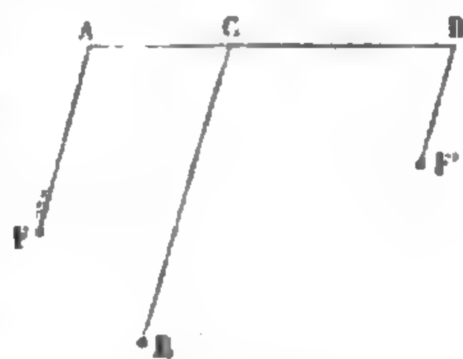


Fig. 6. Forces parallèles.

Si, par exemple, les deux forces F et F' sont égales, le point C

sera au milieu de AB; si la force F est double de F', le segment CA devra être moitié de CB.

On peut, à l'aide de l'appareil suivant, connu sous le nom de *levier arithmétique,* vérifier la justesse de cette proposition.

Le levier AB supporte deux poids égaux P à ses extrémités; il est suspendu par son milieu à un cordon qui, passant sur la poulie de renvoi M, soutient un poids P'. On reconnaît que lorsque le poids P' a une grandeur convenable, le levier est en équilibre; d'où il suit que les deux poids P et les poids des diverses parties du levier, que l'on peut supposer distribués deux à deux à égale distance du point milieu, ont une résultante appliquée en ce point, laquelle est égale et opposée à la force P'. On constate en outre que P' est égal à la somme des deux poids P et du poids même du levier.

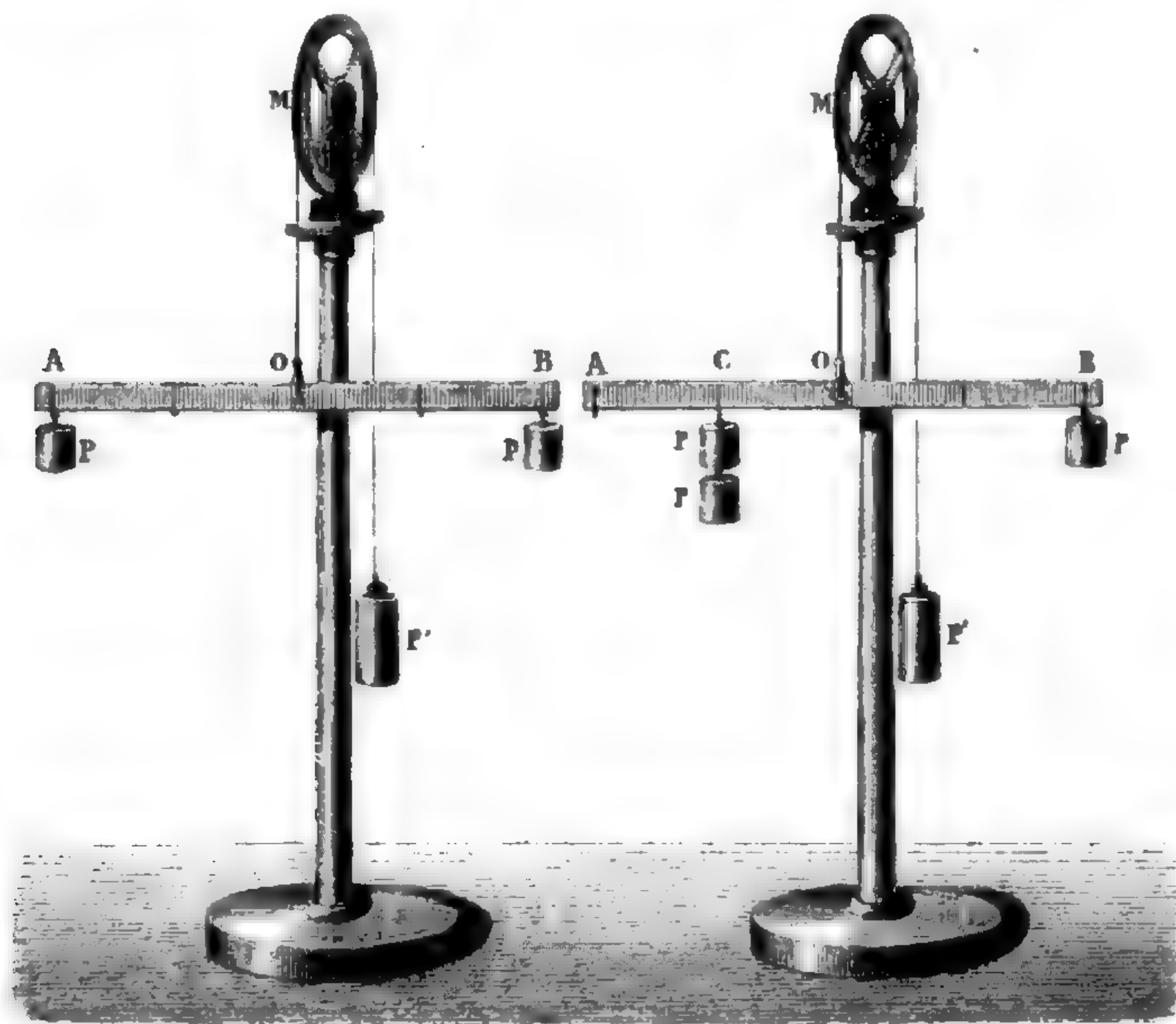


Fig. 7. — Composition des forces parallèles.

Dans le cas de la seconde figure, un poids unique P est placé à l'une des extrémités B, tandis que deux poids égaux sont suspendus au milieu C de la seconde moitié du levier. On reconnaît qu'il y a encore équilibre, pourvu que le poids P' soit la somme des trois poids P et de celui du levier.

Pour interpréter ce résultat, il faut remarquer que le levier étant équilibré directement par une portion convenable de P', on peut négliger son propre poids; il reste donc seulement deux forces dont l'une, celle qui est à gauche, est deux fois plus grande que l'autre. Or la résultante passe évidemment au point de suspension O qui se trouve précisément à une distance de B double de celle qui le sépare du point C.

14. Lorsque les forces parallèles F et F' sont dirigées en sens contraire, il y a encore une résultante parallèle aux composantes dirigées dans le sens de la plus grande des deux et égale à leur différence F — F'. De plus, son point d'application C est tellement placé, que les distances CA et CB sont inversement proportionnelles aux forces, résultat analogue à ce qui a lieu lorsque les forces sont dirigées dans le même sens.

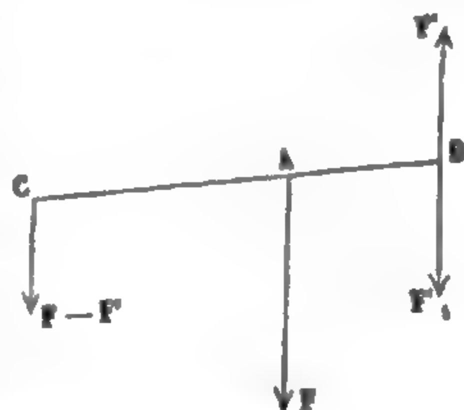


Fig. 8. — Forces parallèles et de sens contraire.

On voit, d'après cette proposition, que si les forces parallèles et opposées diffèrent très-peu l'une de l'autre, la résultante a une valeur très-petite; mais son point d'application s'éloigne beaucoup. Dans le cas particulier où les deux forces seraient égales, la règle de composition est absolument inapplicable. Un pareil système, composé de deux forces égales parallèles et dirigées en sens contraire, porte le nom de *couple*. Il n'est pas susceptible d'être équilibré ou remplacé par une force unique, mais on conçoit qu'il tend à produire un mouvement de rotation. Or dans la nature nous voyons tous les corps posséder à la fois un mouvement de translation et un mouvement de rotation. On peut admettre que la translation est produite par une force et la rotation par un couple; ce dernier se présente donc comme une sorte d'*élément naturel* en mécanique; il constitue une conception très-originale due au géomètre Poinsot, et qui est d'ailleurs souvent susceptible d'apporter de grandes simplifications dans l'étude de la mécanique.

15. Composition d'un nombre quelconque de forces parallèles. — Pour composer ensemble un certain nombre de forces parallèles, F, F', F'', F''', on compose d'abord la première avec la seconde, ce

qui donne une première résultante partielle r; celle-ci, composée avec la troisième force F'', donne une deuxième résultante r' qui, combinée avec F''', donne la résultante générale R. Il est clair que ce procédé est applicable à un nombre de forces quelconque et que la résultante est toujours égale à la somme de toutes les forces. Quant à son point d'application, remarquons que le point d'application de la première résultante partielle s'obtient en divisant AB en deux parties AI et BI, inversement proportionnelles à F et F'. De même le point d'application K de r' s'obtient par la division de IC en parties IK et KC inversement proportionnelles à r et F'', et enfin le point d'application L de la résultante générale s'obtient par une opération analogue faite sur la droite KD. Or on remarquera que cette série de constructions est indépendante de la direction absolue des forces et suppose seulement qu'elles sont parallèles; si donc les forces venaient à tourner autour de leur point d'application, mais de façon à rester toujours parallèles entre elles, la résultante passerait toujours par le point L. Ce point, à raison de cette circonstance, a été nommé *centre des forces parallèles*.

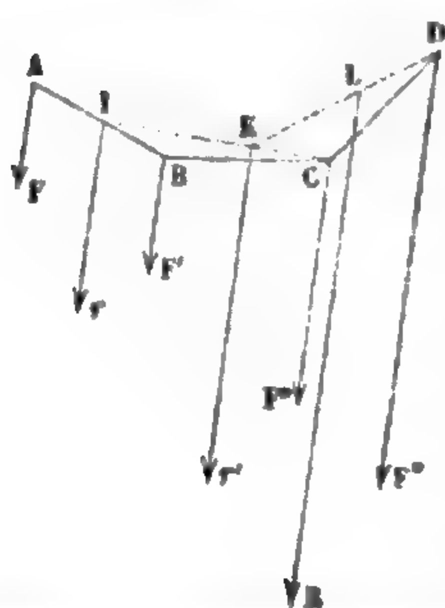


Fig. 9. — Composition d'un nombre quelconque de forces parallèles.

16. Décomposition des forces. — De même qu'on peut composer un certain nombre de forces en une force unique, on peut aussi décomposer une force donnée en deux ou un plus grand nombre de forces qui produiraient le même effet. Ainsi, par exemple, la force AD (fig. 2) peut être remplacée par les deux forces AB et AC, puisqu'elle est précisément leur résultante. On voit que pour décomposer une force appliquée à un point matériel en deux autres suivant des directions déterminées, il faut par l'extrémité D de la longueur qui représente la force à décomposer, mener des droites parallèles aux directions données; elles déterminent par leur intersection les points B et C et, par suite, les grandeurs AB et AC des deux forces qui peuvent être substituées à la force donnée.

La composition de plusieurs forces en une force unique consti-

tue une simplification évidente sur laquelle il est inutile d'insister. Quant à la décomposition, on ne voit pas aussi bien son utilité ; il semble, au premier abord, que ce soit une complication. Il n'en est pas ainsi toutefois, et nous verrons dans le cours de ce traité qu'on en fait un usage continuel. On conçoit, en effet, que quand une force est appliquée à un point dont les mouvements sont gênés par certaines liaisons physiques, on n'aperçoive pas facilement l'effet que cette force peut produire. Mais on peut quelquefois, en la décomposant, la remplacer par des composantes dont les unes s'annulent par les conditions mêmes du système, et dont les autres peuvent agir d'une façon directement appréciable.

Nous nous bornerons à donner de ceci un seul exemple, c'est l'explication de la route opposée que peuvent prendre deux bateaux



Fig. 10. — Décomposition de l'action du vent sur les voiles.

placés au même point et, par suite, soumis à l'impulsion du même vent. On sait que ce résultat s'obtient par une orientation convenable de la voile.

Considérons, par exemple, le cas de la première figure. Le vent soufflant dans la direction V*m* donne lieu à une impulsion que l'on peut décomposer en deux au point *m*, l'une *tt'* tangentielle à la voile qui n'a aucun effet, l'autre perpendiculaire *mn*. Cette dernière tend à pousser obliquement le bateau vers la gauche de la figure. Mais le mouvement du bateau s'effectuant surtout avec facilité dans le sens de son axe, on peut décomposer cette dernière force en deux

autres : l'une perpendiculaire à l'axe, qui n'a que peu d'effet ; l'autre dans la direction même de l'axe, qui détermine la progression du bateau dans le sens de la flèche placée au-dessous de la figure.

Dans la seconde figure, on voit que les mêmes décompositions conduisent à un résultat opposé et que le sens du mouvement est contraire, bien que la direction du vent soit la même. En réalité, les deux mouvements ne sont pas directement contraires, parce qu'il est impossible de négliger l'action de la composante perpendiculaire à l'axe du bateau ; cette action, toujours appréciable, produit ce qu'on appelle la dérive.

17. Travail d'une force. — Dans les diverses opérations auxquelles on applique les forces, qu'il s'agisse d'élever des fardeaux, de comprimer, de percer, de pulvériser des corps solides, il est clair qu'il faut toujours surmonter une certaine résistance et produire un certain déplacement. On est donc conduit à considérer, au point de vue des applications, un élément mécanique spécial, combinaison de la force et du déplacement de son point d'application ; c'est ce qu'on appelle le travail.

Le travail d'une force est le produit de cette force par le déplacement qu'elle fait subir à son point d'application.

On suppose, dans cette définition, la force constante et le mouvement du point d'application suivant la direction même de la force.

Pour évaluer le travail d'une machine, on prend pour unité le travail correspondant au poids d'un kilogramme élevé à un mètre de hauteur ; c'est ce qu'on nomme le *kilogrammètre.*

La notion du travail est par elle-même indépendante du temps ; mais il est bien évident que dans la pratique une machine est d'autant plus avantageuse, qu'elle emploie moins de temps à produire un travail déterminé. On a donc dû introduire cet élément du temps dans l'unité qui sert à se rendre compte du travail des machines. Cette unité est le *cheval-vapeur;* elle correspond à un travail de 75 kilogrammètres par seconde. Ainsi une machine dite de 30 chevaux est une machine qui serait capable d'élever en une seconde $30 \times 75 = 2250$ kilogrammes à un mètre de hauteur en une seconde ; ou plus généralement un certain nombre de kilogrammes P à une hauteur H telle que le produit PH soit égal à 2250.

CHAPITRE III.

CONSTITUTION DES CORPS.

18. Divers états de la matière. — La physique ayant pour objet l'étude des propriétés générales des corps, il importe de se faire une idée de la constitution de ces derniers. Nous remarquerons d'abord qu'ils peuvent se présenter à nous sous trois états différents : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Les corps solides sont caractérisés par une sorte d'invariabilité de la forme, laquelle ne saurait être changée qu'à l'aide d'un effort plus ou moins considérable. Ils forment par conséquent un tout dont les diverses parties ont une solidarité mutuelle, si bien, par exemple, que le mouvement de l'une d'elles détermine celui des autres.

Les corps liquides paraissent formés, au contraire, de particules indépendantes les unes des autres, pouvant obéir individuellement à l'action des forces qui les sollicitent, et glisser ainsi avec la plus grande facilité les unes sur les autres. De cette particularité vient le mot *fluides* par lequel on les désigne souvent (*fluere,* couler). C'est aussi à raison de cette circonstance que les particules prennent les diverses positions nécessitées par la forme des vases dans lesquels on place les liquides. Ceux-ci se moulent exactement sur les parois, de sorte qu'on peut dire qu'ils n'ont d'autre forme que celle des vases qui les contiennent. La liquidité, consistant essentiellement dans la mobilité parfaite des parties constituantes d'un corps, peut se rencontrer évidemment à différents degrés de perfection. Ainsi l'éther sulfurique, l'alcool, sont des liquides plus mobiles que l'eau, l'eau est plus mobile elle-même que l'huile, etc. On désigne sous le

nom de viscosité le défaut d'indépendance entre les particules liquides, qui établit une sorte d'état intermédiaire entre ces corps et les solides; aussi peut-on dire qu'il y a un passage insensible des liquides plus ou moins parfaits aux liquides visqueux, de ceux-ci aux corps appelés mous et de ces derniers aux corps solides.

Les corps gazeux, dont l'air atmosphérique nous offre un exemple, sont formés, comme les liquides, de particules indépendantes. Mais il y a plus : ces particules paraissent être dans un état continuel de répulsion, de telle sorte qu'une masse gazeuse a une tendance continuelle à se répandre dans un volume de plus en plus grand. C'est en cela que consiste l'expansibilité des gaz, au sujet de laquelle on fait ordinairement l'expérience suivante.

On place sous le récipient d'une machine pneumatique une vessie dégonflée et fermée. Dans cet état, l'air qu'elle contient et l'air extérieur agissent en sens inverse, en vertu de leur expansibilité propre, et se font mutuellement équilibre. Mais si l'on vient à faire

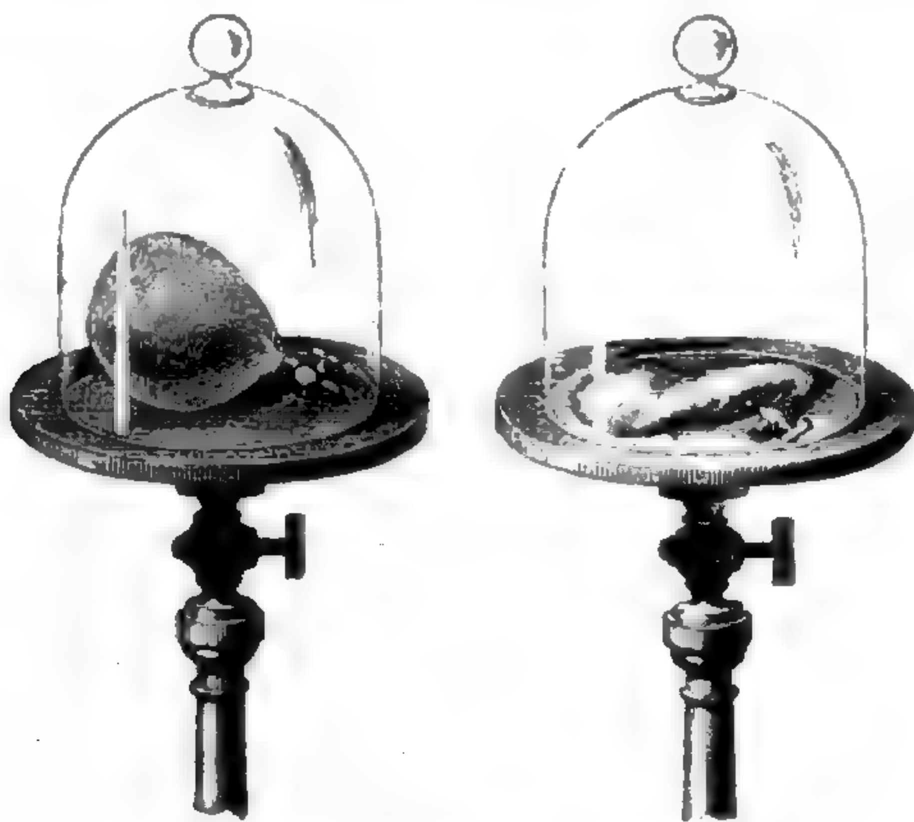


Fig. 11. — Expansibilité des gaz.

fonctionner la machine qui a pour effet d'enlever une partie de l'air extérieur, la force expansive de l'air intérieur n'étant plus contre-balancée au même degré, on voit la vessie se gonfler graduellement et manifester ainsi la tendance qu'a le gaz qu'elle contient à occuper un volume plus grand.

Il suit de là que, quelque grand que soit un vase, il peut toujours être rempli par une quantité quelconque d'un gaz qui exercera, dans tous les cas, une certaine pression sur les parois. C'est à l'existence de cette pression, résultat même de l'expansibilité, qu'est dû le nom de fluides élastiques qu'on donne souvent aux gaz.

Il convient de remarquer que la même substance peut, suivant les températures, se présenter sous les trois états; ainsi l'eau, par les froids de l'hiver, passe à l'état solide : c'est la glace. Aux températures ordinaires, il y en a toujours une portion qui est répandue dans l'atmosphère à l'état de gaz : c'est ce qu'on appelle la vapeur d'eau. Si les conditions thermiques du globe terrestre venaient à changer notablement dans un sens ou dans un autre, quelques-uns des corps que nous voyons habituellement à l'état liquide, par exemple, seraient ou solides ou à l'état de vapeurs. Ainsi, un froid rigoureux amènerait la congélation de la totalité de l'eau qui existe à la surface du globe; une température élevée en produirait la vaporisation complète.

19. Constitution moléculaire.— Quel que soit l'état sous lequel se présente un corps, on admet aujourd'hui en physique qu'il n'est pas formé d'une matière continue, qu'il est au contraire le résultat de l'agrégation, de la réunion de parties distinctes tenues à distance les unes des autres. Ces parties, éléments constitutifs des corps, s'appellent particules ou molécules. On doit les considérer comme soumises à des actions mutuelles, les unes attractives, les autres répulsives, qui dans les corps solides et les corps liquides se font équilibre. Il n'en est pas de même des gaz; dans cette classe de corps il y a entre les éléments une force répulsive permanente qui donne lieu à l'expansibilité ou à la force élastique.

Les molécules des corps solides et des corps liquides ne doivent pas être considérées comme pareilles. En effet, dans ces derniers corps, chacune d'elles peut tourner sur elle-même sans qu'il en résulte une modification quelconque dans l'équilibre; celui-ci, en d'autres termes, résulte uniquement des distances moléculaires et nullement de la forme ou de la disposition réciproque des molécules. On se fait de cette constitution physique une idée approximative suffisamment juste, en admettant que les molécules

liquides ont une forme sphérique; dès lors il est évident que l'équilibre moléculaire résulte uniquement de la distance des centres des sphères.

L'influence de la forme et de la disposition réciproque des éléments caractérise les solides. Il semble que leurs molécules, suivant l'idée de quelques philosophes anciens, formées de parties crochues, s'enchevêtrent les unes dans les autres, et donnent lieu ainsi à une figure déterminée de l'ensemble. Il n'est pas besoin de cette image, un peu grossière, pour se rendre compte de la solidité; il suffit de concevoir seulement que lorsqu'on vient à exercer un effort sur une portion d'un corps solide, les molécules tournent sur elles-mêmes, s'orientent d'une manière différente et se placent dans une nouvelle position d'équilibre. C'est à cela que correspond l'invariabilité de la forme par laquelle on caractérise ordinairement l'état solide. En réalité, cette invariabilité n'existe pas, et si petite que soit une force appliquée à un corps solide, elle doit produire un changement de forme, mais souvent ce changement n'est appréciable que quand la force est très-intense.

20. Divisibilité. — Cette hypothèse sur la constitution des corps revient à admettre que la matière n'est point indéfiniment divisible, que quelle que soit la nature des agents mis en jeu, il y a pour chaque corps une limite au-dessous de laquelle la division ne descend jamais. Ces parties toujours indivisées de la substance d'un corps portent le nom d'atomes (α privatif, τέμνω couper), et il faut entendre par cette expression non point des éléments insécables d'une façon pour ainsi dire absolue ou métaphysique, mais des éléments qui, par aucune des forces connues, ne sont susceptibles d'être divisés.

C'est surtout en chimie qu'on trouve les bases de la doctrine qui admet une limite à la division de la matière; on voit en effet dans les phénomènes chimiques cette division atteindre des limites fort reculées sans doute, mais fixes. La composition des corps composés est invariable, quelles que soient les circonstances de leur production; leurs propriétés, qui devraient changer suivant le degré de petitesse des parties qui s'unissent, sont aussi les mêmes; d'où il faut conclure que les éléments entre lesquels s'exerce l'affinité

chimique ont une existence propre, qu'ils ne sauraient ni s'altérer, ni se briser, ni se modifier d'une manière quelconque. Ce sont là les véritables *individus* de la nature minérale, ce sont eux qu'on appelle atomes.

Dans la notion d'atome n'entre pas l'idée de grandeur, mais l'expérience nous apprend que l'atome doit être d'une prodigieuse petitesse, car nous pouvons, par des procédés divers, diviser la matière en parties extrêmement ténues, sans que rien autorise à penser que nous ayons atteint la limite de la division, ou même que nous en ayons approché; nous citerons ici quelques exemples qui prouvent l'extrême division possible de la matière.

Wollaston est parvenu à obtenir des fils de platine dont le diamètre ne dépasse pas 1/1200 de millimètre. Le procédé qu'il employait pour les préparer consiste à tirer à la filière un fil d'argent dont l'axe est occupé par du platine et à dissoudre la couche d'argent dans de l'acide azotique. On peut en employant ce procédé obtenir des fils tellement minces, qu'ils sont réellement invisibles d'une manière directe et qu'on ne peut s'assurer de leur existence qu'à l'aide de certains phénomènes optiques particuliers. Dans l'art du batteur d'or, on obtient des feuilles dont l'épaisseur peut ne pas dépasser 1/10000 de millimètre. Une pareille feuille de 1 décimètre carré de surface ne pèse pas 2 centigrammes. Si l'on conçoit un carré de 1/10 de millimètre de côté, dimension qui, quoique très-petite, est parfaitement perceptible à l'œil, on voit que la feuille considérée en contiendrait un million; de sorte que les 2 centigrammes d'or se trouvent effectivement divisés en un million de parties visibles.

C'est surtout dans la diffusion des substances colorantes et odorantes que la matière se divise jusqu'à une limite extrêmement reculée; ainsi, 1 millimètre cube d'indigo dissous dans l'acide sulfurique peut colorer d'une manière appréciable plus de dix litres d'eau. Or, dans un litre se trouve un million de millimètres cubes, volume très-nettement perceptible; le millimètre cube d'indigo se divise donc, dans cette expérience, en dix millions de parties visibles.

La diffusion des matières odorantes est plus étonnante encore : on sait qu'un grain de musc peut fournir, pendant des années, à

l'air qui se renouvelle autour de lui, des particules en nombre suffisant pour lui communiquer son odeur; l'esprit a peine à se faire une idée du degré de ténuité que doivent avoir des particules semblables.

Mais rien sous le rapport de la division de la matière ne peut être comparé comme résultat à ce qui se produit, ou plutôt est censé se produire, dans la confection des doses homœopathiques. Voici, en quelques mots, le procédé employé. On prend, par exemple, 1 centigramme du médicament et on le mêle à 99 centigrammes d'une substance inerte; on prend 1 centigramme de cette solution et on la mêle avec 99 centigrammes de la matière inerte, et ainsi de suite pendant un certain nombre de fois : les homœopathes vont au delà de la trentième solution. En se plaçant au point de vue physique pur, on peut dire qu'il y a dans l'emploi de ces procédés l'admission implicite de la divisibilité indéfinie de la matière. En effet, dans une solution au centième amené à la trentième dilution, la proportion du poids du médicament à celui du dissolvant est représentée par une fraction qui, ayant pour numérateur l'unité, aurait pour dénominateur l'unité suivie de 60 zéros; cela correspondrait à peu près à 1 millimètre cube de substance répartie dans une sphère qui aurait pour rayon la distance de la terre aux premières étoiles (1400 milliards de myriamètres). A moins d'admettre la divisibilité indéfinie de la matière, il est impossible de concevoir la diffusion de la substance active dans tous les points de cette immense sphère, et à cet égard la doctrine homœopathique paraît en contradiction avec celle qui suppose tous les corps formés de molécules, et qui forme la base de la physique actuelle.

21. Porosité. — La porosité est une conséquence immédiate de l'hypothèse faite sur la constitution des corps. C'est la propriété générale des corps de posséder dans leur intérieur des intervalles vides ou pores entre leurs particules matérielles. Cette porosité constitue souvent un caractère très-sensible et qui permet, par exemple, le passage des liquides ou des gaz à travers la substance même des solides : on lui donne alors le nom de perméabilité. C'est la perméabilité que l'on utilise dans l'emploi des filtres, de la pierre filtrante par exemple; les pores sont assez larges pour laisser passer l'eau et

assez étroits pour arrêter au passage les petits corps solides tenus en suspension dans l'eau elle-même.

C'est à raison de la perméabilité que se fait dans l'organisation la communication, le contact des liquides qui doivent agir l'un sur l'autre; car nulle part les vaisseaux ne sont ouverts et c'est toujours à travers la substance de leurs parois que se font les derniers échanges d'éléments nécessaires à l'action vitale.

En faisant intervenir une pression considérable, on peut faire passer les liquides à travers les métaux. Ces derniers, ou du moins quelques-uns d'entre eux, le fer et le platine par exemple, portés à une température élevée, livrent un passage des plus faciles à différents gaz. C'est ainsi que les poêles en fonte peuvent, quand ils sont rouges, laisser passer au dehors quelques-uns des produits insalubres de la combustion, et donner lieu à des accidents plus ou moins graves.

Mais alors même qu'on ne peut constater aucun degré de perméabilité, on doit toujours admettre qu'il existe des pores, et on en trouve la preuve dans ce fait que tous les corps peuvent augmenter ou diminuer de volume, qu'ils sont tous dilatables et compressibles. La dilatation des corps par l'action de la chaleur est un phénomène général qui sera étudié plus loin; nous parlerons seulement ici de la compressibilité.

22. Compressibilité. — La compressibilité consiste dans la réduction de volume qu'éprouvent les différents corps sous l'action d'une pression extérieure. La compressibilité des solides est extrêmement faible, c'est-à-dire qu'il faut une pression extrêmement considérable pour produire une diminution de volume sensible. Toutefois le fait a été plus d'une fois constaté, notamment dans les constructions où l'on a souvent besoin d'en tenir compte.

La compressibilité des liquides, plus forte que celle des solides, est encore extrêmement faible. Aussi, en les comparant aux gaz, les a-t-on appelés souvent fluides incompressibles. On peut très-aisément, à l'aide de l'appareil imaginé par Œrstedt et que représente la figure 12, constater que les liquides sont plus compressibles que les solides, et mesurer approximativement le degré de leur compressibilité. Le liquide à comprimer est renfermé dans une sorte de

gros thermomètre *b*, appelé piézomètre, dont le tube est soigneusement divisé et dont on a jaugé le réservoir de façon que l'on sait à combien de divisions du tube équivaut son volume. Une bulle de mercure placée au-dessus de la colonne liquide sert d'index, et l'appareil est placé dans un vase *a* à parois très-épaisses.

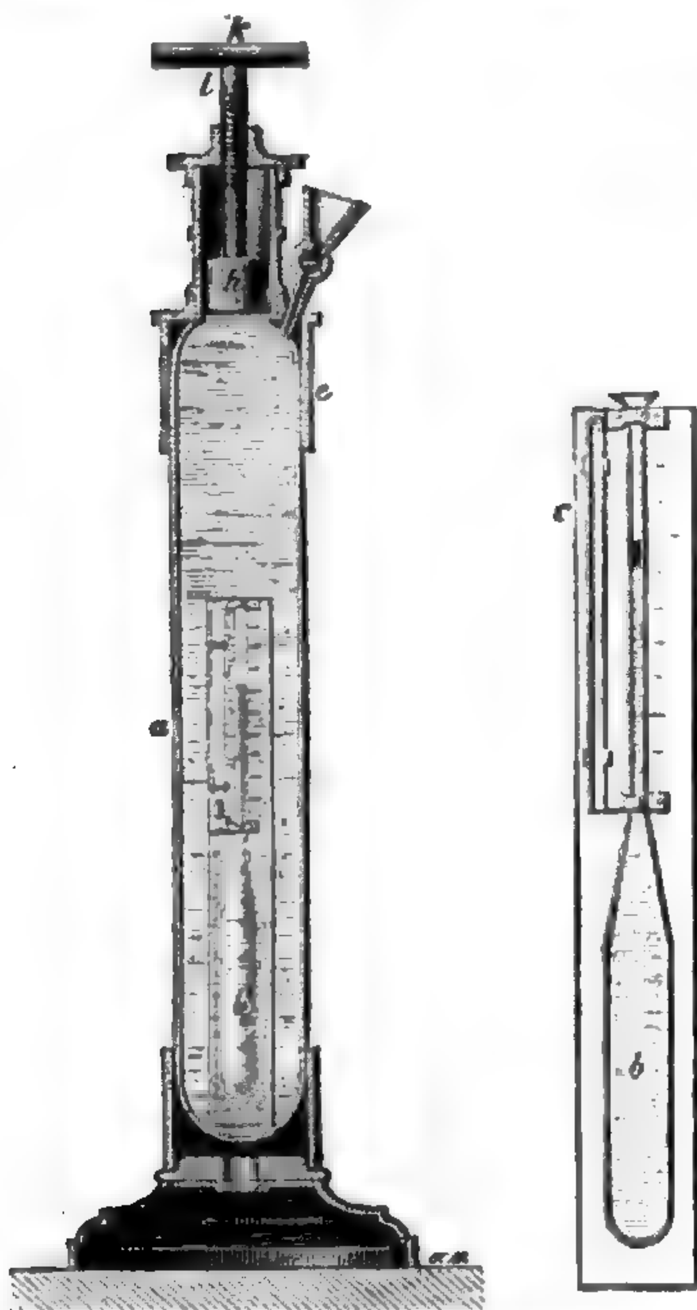


Fig. 12. — Piézomètre d'Œrstedt.

On exerce alors à l'aide du bouchon à vis *klh* une pression plus ou moins considérable, et on voit l'index de mercure descendre et accuser ainsi une diminution de volume du liquide. Quant à la pression, elle se déduit du volume de l'air contenu dans le tube *c* qui sert de manomètre. Dans cette expérience, le nombre de divisions dont se meut l'extrémité de la colonne liquide indique la diminution *apparente* de volume, c'est-à-dire l'excès de la diminution du volume du liquide sur celle de l'enveloppe. Il est aisé en effet de concevoir que le vase thermométrique lui-même doit, sous la pression qu'il subit, éprouver une variation de capacité dont il est nécessaire de tenir compte. Œrstedt supposait que cette variation est insensible ou nulle, puisque la pression se manifeste à l'extérieur aussi bien qu'à l'intérieur du piézomètre. Mais cette conclusion est erronée, car si l'on suppose le vase thermométrique plein et qu'on le soumette à une compression, les couches intérieures devront réagir avec une force précisément équivalente à celle qui se produit lorsque le liquide occupe l'intérieur de l'instrument creux. Il suit de cette remarque que le piézomètre, dans l'expérience d'Œrstedt, éprouve une diminution de volume égale à celle qu'éprouverait un piézomètre plein dans les mêmes circonstances.

Il faut donc, pour avoir la diminution véritable du volume du liquide, ajouter à la contraction apparente celle de l'enveloppe. Cette dernière est assez délicate à connaître, et les différents auteurs n'ont pas été d'accord sur la manière de la calculer. Ce qu'il y aurait de plus simple, ce serait, ainsi que le fait M. Jamin dans des recherches qui ne sont pas encore terminées, de la mesurer directement.

Il résulte des expériences faites sur ce sujet, que la compressibilité de l'eau est de 0,000048 pour une pression de 1 kilogramme par centimètre carré de surface (une atmosphère); elle diminue quand la température augmente. L'alcool et l'éther sont un peu plus compressibles; mais, contrairement à ce qui a lieu pour l'eau, la compressibilité augmente avec la température. Le mercure est beaucoup moins compressible, à peu près 16 fois moins que l'eau : on peut donc, dans les expériences ordinaires, négliger tout à fait la variation de son volume.

Les gaz sont énormément plus compressibles que les solides et les liquides; il suffit pour s'en convaincre de se servir de l'instrument appelé, on verra plus tard pourquoi, briquet à air.



Fig. 13. Briquet à air.

C'est un cylindre de verre à parois épaisses, fermé à une de ses extrémités. On adapte à l'autre un piston qui joint exactement le tube; il suffit alors de presser avec une certaine force pour réduire le gaz à la moitié, au tiers, au dixième de son volume.

On doit conclure de là que dans les gaz les particules sont incomparablement plus écartées que dans les solides et les liquides, et par conséquent qu'il existe beaucoup moins de matière sous le même volume. Pour donner une idée de cette différence, il nous suffira de dire qu'un centimètre cube d'eau réduit en vapeur à la température de 100° occupe, sous ce nouvel état, un volume de 1700 centimètres cubes environ.

23. Élasticité. — La constitution moléculaire des corps conduit à la notion de l'élasticité. Il résulte, en effet, des explications précédentes que, si des forces extérieures viennent à agir sur un corps, les

molécules se rapprocheront ou s'éloigneront les unes des autres, jusqu'à ce qu'un nouvel état d'équilibre se soit établi entre les forces extérieures et les forces moléculaires. Si alors les premières cessent d'agir, il pourra arriver que les molécules reprennent exactement leurs positions primitives. Toutefois elles ne s'arrêteront pas immédiatement dans ces positions, elles les dépasseront en vertu des vitesses acquises et exécuteront autour d'elles un certain nombre d'oscillations. C'est ainsi, par exemple, qu'une lame d'acier fixée à une de ses extrémités et dont on écarte l'autre, revient à sa première position en exécutant autour d'elle une série de vibrations. On donne le nom d'*élasticité* à la propriété en vertu de laquelle les molécules des corps, écartées de leurs positions d'équilibre par des forces extérieures, y reviennent quand ces forces ont cessé d'agir. Il y a sous ce rapport de très-grandes différences entre les corps solides; les uns, comme le caoutchouc, peuvent subir de très-grandes déformations sans cesser de revenir à leur premier état; tandis que d'autres, comme la cire molle, la terre glaise, conservent successivement les diverses formes qu'on leur imprime. Dans les premiers la *limite d'élasticité* est très-étendue, dans les seconds elle est très-faible ou nulle. On dit aussi que les premiers corps sont très-élastiques, tandis que les seconds le sont très-peu. Toutefois ces expressions ne sont pas très-précises et peuvent donner lieu à des équivoques. On peut dire en effet qu'un corps est très-élastique lorsqu'une certaine action extérieure développe une très-forte réaction moléculaire, circonstance qui ne suppose pas du tout que la limite d'élasticité soit étendue. A ce point de vue, les corps analogues au caoutchouc seraient peu élastiques.

Dans les liquides et les gaz il n'y a pas de limite d'élasticité. En effet, la forme et la disposition des molécules n'ayant aucune influence sur l'équilibre, celui-ci ne dépend que de l'intervalle qui les sépare. Il en résulte que ces molécules reviendront à la même distance lorsque les forces auront la même valeur. Aussi, quelque compression que l'on exerce sur un liquide ou sur un gaz, ceux-ci reprennent toujours leur volume primitif, lorsque la force qui produit la compression cesse d'agir.

Les applications de l'élasticité des solides sont nombreuses et

importantes. C'est à son élasticité que le caoutchouc doit d'être employé dans un si grand nombre de circonstances. L'acier plus ou moins trempé est une des substances qui présentent cette propriété à un degré remarquable, et c'est avec lui qu'on construit tous les ressorts. Les ressorts sont employés comme moteurs dans les montres, les pendules, les tournebroches, par suite de leur disposition à reprendre leur première forme quand on les a tendus. Ils sont également d'un usage continuel dans les machines pour maintenir et ramener dans des positions invariables certaines pièces qui ne doivent s'en écarter que très-peu, comme, par exemple, les soupapes, les armatures des électro-aimants, etc.

Dans les voitures suspendues, le corps de la voiture est porté par des ressorts formés de lames d'acier assujetties ensemble, mais dont les longueurs vont en décroissant ; de cette façon le milieu où s'exerce l'effort principal du poids a une épaisseur suffisante pour y résister, tandis que les extrémités possèdent la flexibilité nécessaire au but qu'on se propose, qui est d'atténuer la violence des chocs que peut recevoir l'essieu.

L'élasticité des ressorts fournit un moyen très-simple de comparer les forces entre elles. La figure 14 représente un des appareils propres à atteindre ce but ; on le nomme un *dynamomètre*. Il est formé de deux lames d'acier AB et A'B' articulées à leurs extrémités à deux brides métalliques qui les réunissent. Le milieu de la lame supérieure présente un anneau que l'on peut suspendre à un point fixe ; au point correspondant de la lame inférieure se trouve un crochet qui peut recevoir des poids, ou par lequel on peut faire agir les forces que l'on veut comparer. Sous l'action de ces forces, les lames de ressort se recourbent, la distance des points milieux augmente et cet accroissement peut servir de mesure à l'action de la force elle-même. D'ailleurs, si on cherche le nombre de kilogrammes qui produit la même flexion qu'une force donnée, ce nombre exprimera la grandeur même de la force, et on conçoit ainsi que toutes les forces puissent être évaluées en kilogrammes.

L'élasticité étant un phénomène moléculaire, il est évident que toutes les circonstances qui auront pour résultat de modifier la constitution moléculaire des corps changeront aussi leur élasticité ;

mais, dans l'état actuel de la science, on ne saurait prévoir *à priori* le sens dans lequel ces modifications auront lieu. C'est ainsi que la trempe, qui augmente si notablement la dureté et l'élasticité de l'acier, produit un effet inverse sur le bronze des tam-tams. Cet alliage, en effet, refroidi lentement, possède la fragilité du verre; tandis que, refroidi brusquement, il peut être travaillé au marteau et supporter les chocs qui doivent déterminer son état de vibration.

L'obscurité qui règne encore à beaucoup d'égards dans tout ce qui regarde les actions moléculaires explique l'imperfection relative de la théorie de l'élasticité, malgré les importants travaux de Coulomb, Cagniard de Latour, Poisson, Wertheim, etc. Il existe toutefois une loi générale d'une haute importance: c'est que toutes les fois que la limite d'élasticité n'est pas dépassée, l'écart moléculaire

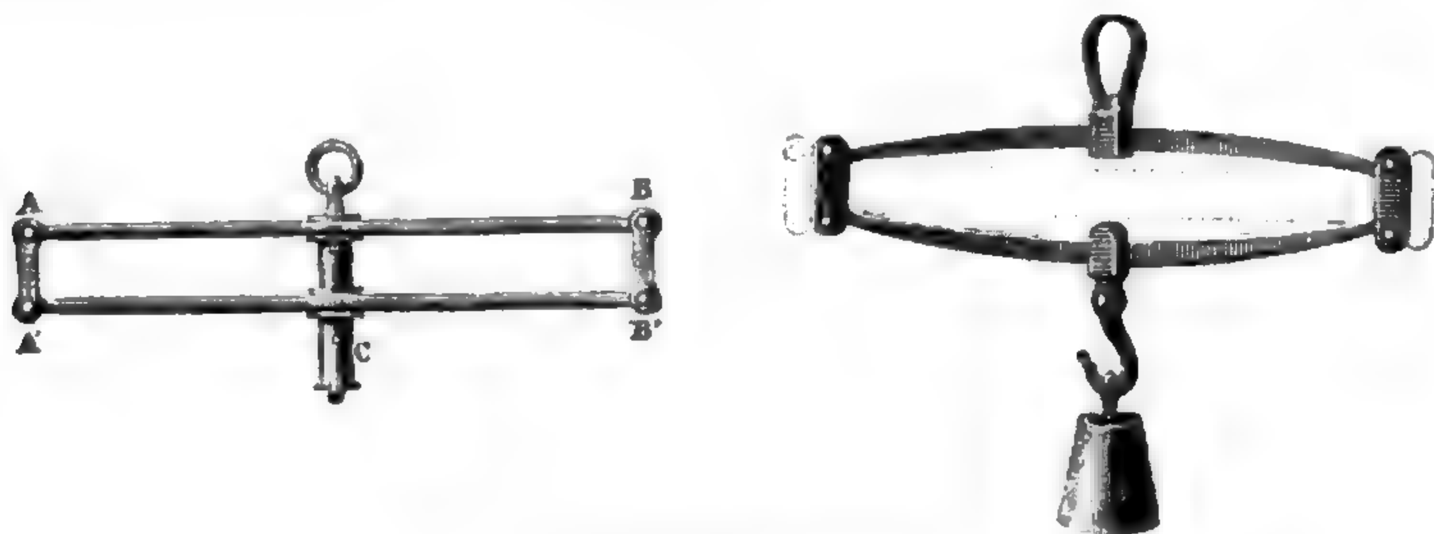


Fig. 14 — Dynamomètre.

est proportionnel à la force qui le produit. Dans le cas, par exemple, d'une barre soumise à des tractions successives, les accroissements de longueur qui en résultent croissent régulièrement comme les tractions. Quant à la valeur absolue de l'allongement pour une traction donnée, elle varie d'une substance à l'autre. La différence qui existe entre les différents corps, à ce sujet, est définie par ce qu'on appelle le coefficient d'élasticité. On appelle ainsi le rapport de la charge à l'allongement. Quand ce coefficient est connu, on peut en déduire l'allongement d'une barre soumise à une traction quelconque. La mesure de cet élément se réduit d'ailleurs à celle de l'allongement effectif, dans des conditions déterminées.

Voici le tableau du coefficient d'élasticité de quelques sub-

stances. Les nombres qu'il contient supposent que la charge est exprimée en kilogrammes par millimètre carré de section et l'allongement en millimètres par mètre.

	Kilogr.		Kilogr.
Plomb.	1803	Cuivre.	12449
Argent.	7358	Platine.	17153
Or.	8131	Acier..	19549
Zinc...	8734	Fer..	20869
Palladium.	11044		

CHAPITRE IV

PESANTEUR.

24. La pesanteur est la force en vertu de laquelle tous les corps tombent à la surface de la terre. Cette force est générale; on en observe les effets dans tous les lieux et pour tous les corps. Si quelques-uns de ces derniers, la fumée, les nuages, paraissent faire exception, c'est qu'ils sont soutenus par l'air atmosphérique de la même façon que le liége est soutenu par l'eau. Dans un espace vide d'air, non-seulement tous les corps tombent, mais, comme nous le verrons plus loin, ils tombent tous avec la même vitesse.

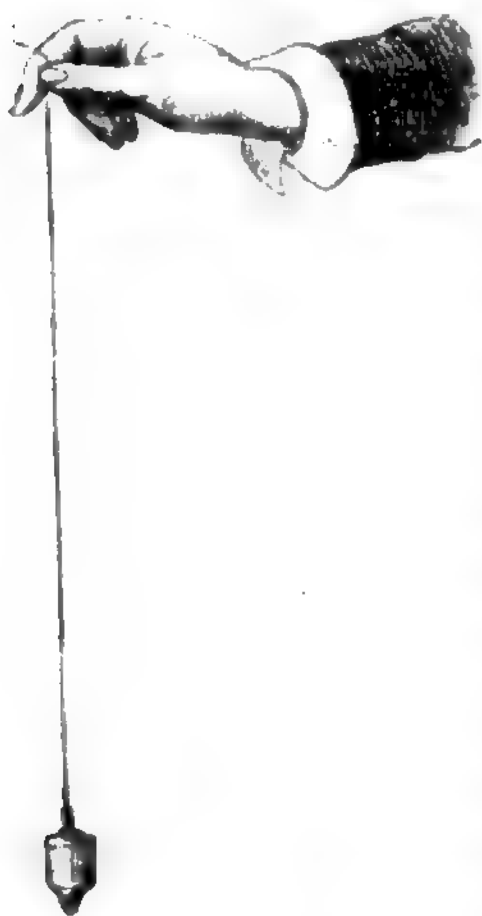


Fig. 15. — Fil à plomb.

25. Direction de la pesanteur. — La direction de la pesanteur se nomme *verticale*. On la détermine facilement à l'aide de l'appareil très-simple appelé fil à plomb. Il se compose d'un fil fixé à l'une de ses extrémités, et portant à l'autre un corps pesant. Lorsque le système est en équilibre, il est clair que la résultante des actions de la pesanteur sur toutes les particules de la masse pesante a exactement la même direction que le fil, puisque c'est lui qui empêche la chute. Mais cette direction ne change pas, on peut le constater, lorsqu'on fait varier la forme et le volume du corps suspendu; c'est donc la direction même de la force appliquée à l'une des particules élé-

mentaires, comme si elle était seule suspendue à l'extrémité du fil.

On peut démontrer que la direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface d'un liquide en équilibre, ou, comme on le dit ordinairement, à la surface des eaux tranquilles. A cet effet on dispose au-dessus de la surface d'un liquide en équilibre un fil à plomb OA; on a la précaution de prendre un liquide un peu opaque, par exemple de l'eau noircie, et on laisse plonger le corps pesant dans le liquide. De cette façon on peut observer avec beaucoup de netteté l'image AB du fil produite par réflexion sur la surface du liquide. On reconnaît ainsi que cette image est rigoureusement sur le prolongement du fil lui-même. Or nous verrons dans la suite de ce traité que l'image produite par un miroir plan est symétrique de l'objet, c'est-à-dire que ses différents points sont sur des perpendiculaires abaissées du point correspondant de l'objet, et prolongées d'une quantité égale à elles-mêmes. Or puisque, dans le cas actuel, l'image est sur le prolongement du fil, c'est que celui-ci est perpendiculaire à la surface.

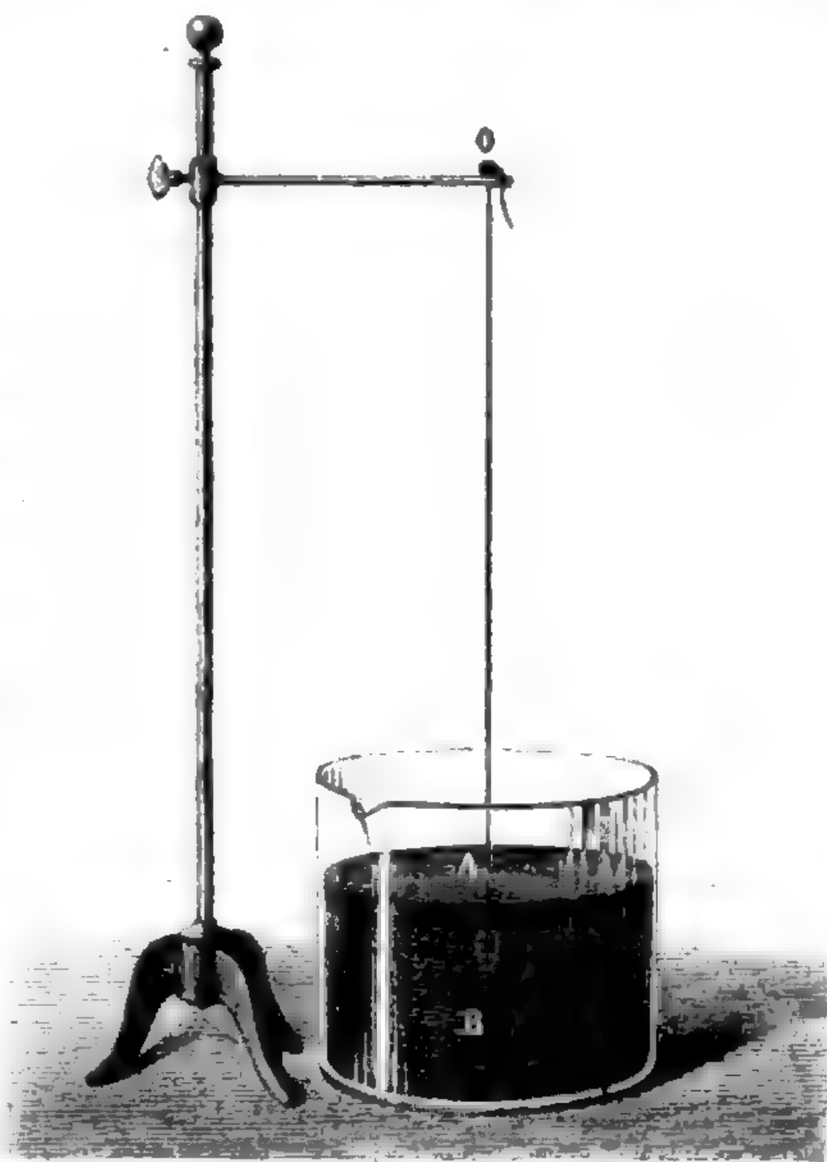


Fig. 16. — Expérience pour démontrer que le fil à plomb est perpendiculaire à la surface d'un liquide en équilibre.

La surface des eaux tranquilles définit en chaque lieu ce que l'on appelle la surface de la terre. C'est la surface de l'Océan supposée tranquille et prolongée de manière à couvrir la totalité du globe terrestre. On sait que cette surface est sensiblement sphérique. Il suit de là que les diverses verticales vont aboutir au centre de la terre. La figure montre la position relative de quelques verticales CZ, CZ', CZ''; on voit évidemment qu'elles forment entre elles des

angles égaux à la distance angulaire qui sépare les lieux correspondants, distance qu'il est toujours facile de calculer.

Dans un même lieu les verticales, à raison de la distance considérable du centre de la terre, doivent être considérées comme véritablement parallèles. Cherchons, par exemple, l'angle formé par deux verticales situées à 1 mètre de distance. On sait que 10 millions de mètres correspondent au quart de la circonférence terrestre, c'est-à-dire à 90 degrés; une longueur de 1 mètre représente donc une distance angulaire égale à $\frac{90^\circ}{10000000}$, c'est-à-dire à 3/100 de seconde environ, quantité complétement inappréciable même avec nos instruments les plus parfaits. Il convient de remarquer d'ailleurs que le parallélisme des verticales dans un même lieu est un fait physique complétement indépendant de toute connaissance préalable de la figure de la terre; on peut s'en assurer directement par les moyens ordinaires.

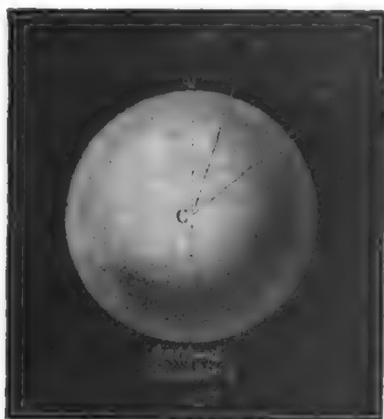


Fig. 17. — Verticales des différents lieux.

26. Point d'application de la pesanteur. — Centre de gravité. — La pesanteur étant une propriété de la matière, a évidemment pour point d'application les diverses particules matérielles qui constituent les corps. Que l'on divise un corps en autant de parties qu'on voudra, qu'on le réduise à l'état de poussière impalpable, chacun des grains ainsi obtenus sera soumis à l'action de la pesanteur. C'est la réunion ou plutôt la résultante de toutes les forces que l'on conçoit ainsi appliquées à chacun des éléments d'un corps qui constitue la force totale qui sollicite le corps à tomber. Or ces diverses forces sont parallèles, comme il vient d'être dit; elles sont d'ailleurs dirigées dans le même sens : leur résultante est donc égale à leur somme et constitue ce que l'on appelle le *poids* du corps, c'est-à-dire la force avec laquelle il presse l'obstacle

qui l'empêche de tomber. Le point d'application G de cette résultante (fig. 18) s'appelle le *centre de gravité*. Il résulte de la propriété indiquée au § 15 que la position de ce point ne varie pas, quand on fait varier la direction des composantes; on peut donc faire tourner le corps sur lui-même, d'une manière quelconque, sans que la position du centre de gravité change. C'est un point fixe qui dépend seulement de la forme du corps et du mode de distribution de la matière dans son intérieur.



Fig. 18.—Parallélisme des actions de la pesanteur sur les différents points d'un corps.

Si le corps a la même densité partout, la position du centre de gravité ne dépend que de la figure, et dans ce cas on peut dire que les corps de formes semblables ont leurs centres de gravité semblablement placés.

La détermination du centre de gravité constitue un problème de mécanique que l'on résout par des méthodes appropriées d'une application générale, et dont nous n'avons pas à parler ici. Nous remarquerons seulement que toutes les fois qu'il y a dans un corps homogène un point de symétrie, on peut affirmer que ce point est lui-même le centre de gravité. Il suit de là que :

1° Le centre de gravité d'une droite est en son milieu;

2° Le centre de gravité d'un cercle ou d'une circonférence est au centre;

3° Le centre de gravité d'un parallélogramme est au point de rencontre des diagonales;

4° Le centre de gravité d'une sphère est en son centre;

5° Le centre de gravité d'un cylindre est au milieu de son axe;

6° Le centre de gravité d'un parallélipipède est au point de concours des diagonales, etc.

On peut être surpris qu'il soit question du centre de gravité de lignes ou de surfaces qui, ne possédant qu'une ou deux des dimensions de l'étendue, ne sauraient avoir de poids, et par conséquent

de centre de gravité. On fait ici une abstraction analogue à celle du point matériel. On suppose des lignes ou des surfaces dont les différents éléments seraient pesants. Les résultats obtenus de cette façon peuvent être utilisés pour la recherche des centres de gravité des corps réels. Ainsi considérons, par exemple, un prisme triangulaire; on pourra le concevoir décomposé en éléments qui seraient pour ainsi dire des triangles pesants. Le centre de gravité du solide se trouvera donc sur la ligne qui réunit les centres de gravité de tous les triangles, et en son milieu. On pourra donc dire que le centre de gravité d'un prisme triangulaire, et en général d'un prisme quelconque homogène, est au milieu de la droite qui joint les centres de gravité des deux bases.

Nous ferons encore une remarque, qui n'est pas sans importance : c'est que le centre de gravité n'est pas un point ayant une existence propre. Il n'y a de réel que les différents points du corps qui sont sollicités par la pesanteur. La résultante de toutes ses actions et ses points d'application sont des conceptions de notre esprit, destinées dans certains cas à faciliter l'étude des phénomènes.

Le centre de gravité peut donc se trouver en dehors du corps: c'est ce qui arrive, par exemple, dans le cas d'une sphère creuse, d'un anneau, etc. Dans les questions mécaniques relatives à ces corps, quand on considérera le centre de gravité, on devra le considérer comme lié invariablement au corps lui-même.

27. Définition physique du centre de gravité. — Le centre de gravité considéré au point de vue mécanique n'est, en réalité, que le centre de forces parallèles distribuées d'une manière déterminée. On peut donc faire la recherche de ce point d'une façon purement géométrique et en dehors de toute idée physique sur la nature des corps. Il est constant toutefois que la découverte du centre de gravité est due à la considération des phénomènes d'équilibre qui se produisent dans les corps sous l'influence de la pesanteur. L'expérience montre, en effet, que dans la plupart des corps il y a un point tel, que, si on vient à le fixer, le corps se trouve entièrement soustrait à l'action de la pesanteur. C'est précisément le centre de gravité. Cette propriété est une conséquence évidente de la définition

mécanique de ce point; mais on peut la prendre pour définition, bien qu'elle ne soit peut-être pas d'une précision suffisante. Nous allons nous en servir dans l'examen de quelques cas d'équilibre qu'il est utile de connaître.

28. Équilibre d'un corps retenu par un axe ou un point fixe.

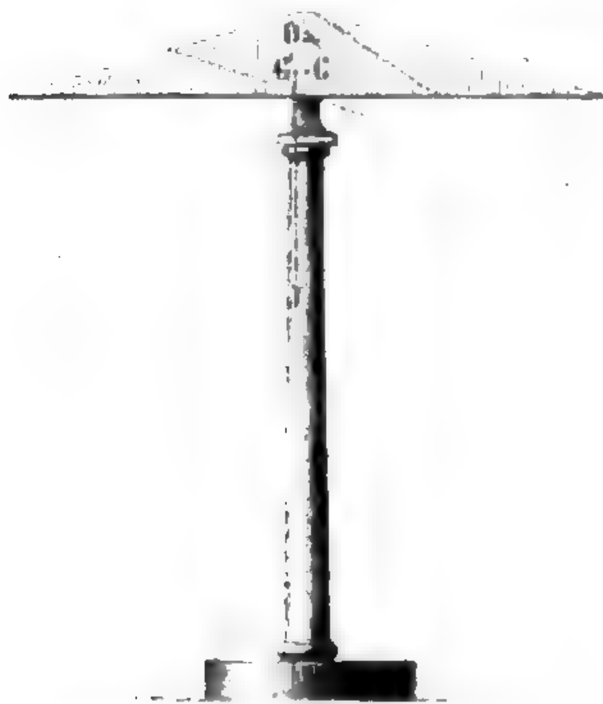


Fig. 19. — Équilibre stable.



Fig. 20. — Équilibre instable.

— Considérons, par exemple, une plaque triangulaire mobile autour d'un axe de rotation O, et soit G la position du centre de gravité. Pour qu'il y ait équilibre, il faut que le centre de gravité soit soutenu, c'est-à-dire que la verticale menée par ce point rencontre l'axe. Cette condition peut être remplie pour deux positions très-différentes du corps : le centre de gravité peut être au-dessus ou au-dessous de l'axe. Dans le premier cas (fig. 20), il est évident que si le corps est tant soit peu dérangé de sa position d'équilibre, l'effet de la pesanteur sera de la lui faire abandonner sans retour. Dans le second cas au contraire (fig. 19), l'action de la pesanteur tend continuellement à rétablir l'équilibre s'il vient à être troublé. Dans le premier cas l'équilibre est *instable;* il est *stable* dans le second. On voit donc que la condition d'équilibre stable, *c'est que le centre de gravité soit au-dessous de l'axe ou du point de suspension.*

Le jouet connu sous le nom d'équilibriste est une application de ce principe. Il est formé d'une figurine en ivoire reposant par un point sur un petit socle horizontal. Deux tiges métalliques fixées

à la figure se terminent inférieurement par deux boules de plomb; le centre de gravité du système se trouve abaissé de cette façon au-dessous du point de suspension; l'équilibre est par conséquent stable. On peut, en effet, imprimer à l'appareil divers mouvements d'oscillation, il finit toujours par se placer dans la position d'équilibre telle, que la verticale menée par le centre de gravité passe par le point d'appui.

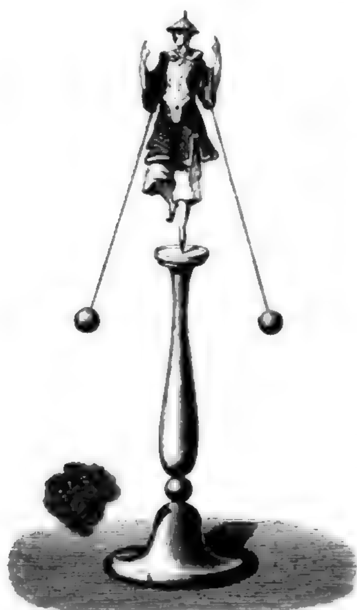


Fig. 21. — Équilibriste.

Si un corps était traversé par un axe passant par son centre de gravité, l'équilibre serait indifférent, c'est-à-dire qu'il aurait lieu dans toutes les positions possibles. Cette condition doit être rigoureusement remplie dans les roues de mécanismes qui ne servent qu'à la transmission du mouvement, et qui ne doivent avoir aucune position d'équilibre qui leur soit propre.

29. Équilibre d'un corps reposant sur un plan horizontal par un point. — Considérons (fig. 22 et 23) un corps de forme ellipsoïdale

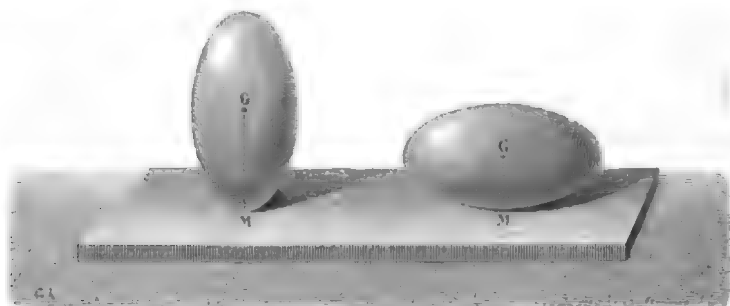


Fig. 22. — Équilibre instable. Fig. 23. — Équilibre stable.

reposant sur un plan horizontal; pour qu'il y ait équilibre il faut, et il suffit évidemment, que la verticale menée par le centre de gra-

vité G rencontre le plan horizontal au point d'appui M. On voit par la figure que cette condition se trouve réalisée dans deux circonstances différentes.

La première figure correspond à l'équilibre *instable*, la deuxième à l'équilibre *stable*. La figure montre que, dans ce dernier cas, *le centre de gravité est le plus bas possible*.



Fig. 24. — Poussahs.

Le poussah (fig. 24) est fondé sur ce principe. Le centre de gravité se trouvant abaissé vers la partie inférieure, par suite de l'accumulation de la matière dans cette région, l'appareil est en équilibre stable. Si l'on vient à l'écarter de sa position et à lui imprimer même des mouvements très-étendus, il se relève toujours et revient à sa position d'équilibre après un nombre plus ou moins grand d'oscillations.

Si le centre de gravité était constamment à la même distance du plan, si, par exemple, le corps avait la forme sphérique, il y aurait équilibre dans toutes les positions; l'équilibre serait indifférent. Remarquons, en général, qu'une position d'équilibre instable est de l'ordre purement mathématique; physiquement il ne saurait y avoir d'équilibre de ce genre. En effet, un pareil équilibre se détruit dès qu'il se produit le plus petit dérangement, et dans la nature une foule de causes, telles que le mouvement de l'air, la flexibilité des points d'appui, etc., amènent des déplacements qui devraient provoquer la rupture de l'équilibre. Si cet équilibre se maintient toutefois dans certains cas, si, par exemple, il est rigoureusement possible de faire tenir un œuf sur sa pointe, c'est à cause du frotte-

ment qui modifie la nature du phénomène et qui constitue une force nouvelle empêchant les causes de rupture d'avoir leur effet.

30. Équilibre d'un corps reposant sur un plan horizontal par plusieurs points. — Lorsqu'un corps repose sur un plan hori-



Fig. 25. — Équilibre d'un corps reposant sur un plan horizontal par plusieurs points.

zontal par un certain nombre de points, il faut pour l'équilibre que la verticale, menée par le centre de gravité, tombe dans l'intérieur du polygone convexe que l'on peut former en réunissant les points d'appui. Il est clair que dans ce cas la pesanteur n'aura d'autre effet que d'appliquer le corps contre le plan. Il est visible d'ailleurs que l'équilibre sera d'autant plus stable que le centre de gravité sera plus bas et que la base de sustentation sera plus considérable. On voit aussi que la stabilité de l'équilibre dépend de la position du point où la verticale du centre de gravité coupe le polygone d'appui. Si, par exemple, ce point d'appui est tout près de la limite du polygone, une petite force dirigée dans un sens convenable pourra détruire l'équilibre, tandis que dans le sens opposé il faudrait une force beaucoup plus considérable.

31. Méthode pratique pour la détermination du centre de gravité. — C'est à des phénomènes d'équilibre du genre de ceux qui viennent d'être cités que sont empruntées les diverses méthodes employées dans la pratique pour la détermination du centre de gravité d'un système. Quelle que soit la nature particulière du procédé, il consiste toujours à placer le corps dans un certain

état d'équilibre qui permette d'assigner une ligne ou une surface sur laquelle se trouve le centre de gravité.

Ainsi, par exemple, si l'on suspend un corps à un de ses points, il est clair que le centre de gravité doit se trouver sur le prolongement du fil de suspension. Il en sera de même si l'on répète l'expérience pour un autre point du corps. Par conséquent, le centre de gravité devra se trouver au point d'intersection G des deux directions obtenues.

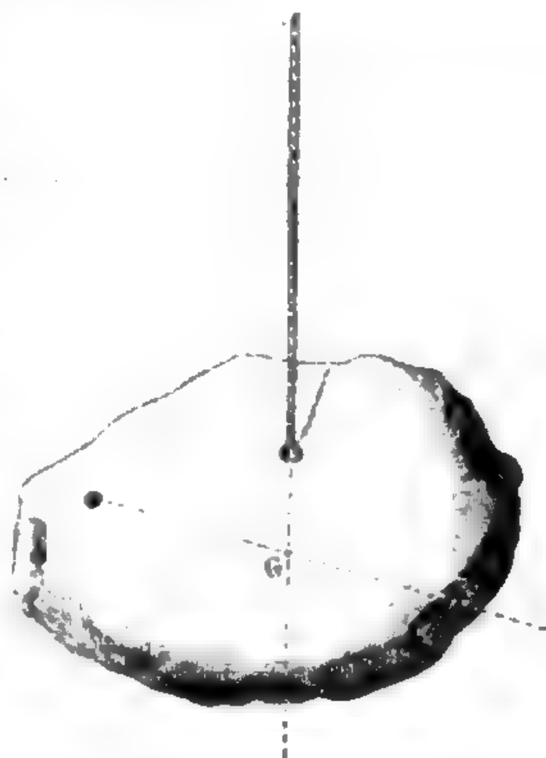


Fig. 26. — Détermination expérimentale du centre de gravité.

Si l'on veut, par exemple, traverser une plaque prismatique par un axe qui passe par son centre de gravité, on cherchera à soutenir le corps en le faisant reposer par deux points de son contour; on aura ainsi une ligne qui contient le centre de gravité de la face sur laquelle on a opéré. En faisant deux opérations semblables, on obtiendra deux lignes qui, par leur intersection, détermineront ce centre de gravité. Il suffira dès lors que l'axe passe par ce point pour qu'il contienne le centre de gravité du corps, puisque ce dernier, ainsi que cela a été dit précédemment, est au milieu de la droite qui passe par les centres de gravité des deux bases.

CHAPITRE V.

LOIS DE LA CHUTE DES CORPS.

32. Dans l'air les corps tombent avec des vitesses inégales; les corps d'une grande densité, comme le plomb, tombent rapidement; les corps légers, comme le duvet, le papier, tombent avec beaucoup de lenteur. On avait cru d'abord que cette différence tient à la nature même des corps, mais il est aisé de voir qu'il n'en est rien. Comprimons le duvet, le papier, de façon à en faire une boulette, réduisons au contraire le plomb en une feuille très-mince, et nous verrons alors que ce dernier corps tombera moins vite que les premiers. Il est naturel, d'après cela, d'attribuer l'inégalité de vitesse que l'on observe à la résistance de l'air, qui doit être d'autant plus forte que les corps présentent à ce fluide une plus grande surface.

C'est Galilée qui découvrit le premier la cause de l'inégale rapidité de chute des différents corps. Pour la mettre en évidence, il façonna de petites boules de substances diverses et les laissa tomber en même temps du haut de la tour de Pise. Elles vinrent toucher le sol presque au même moment; en les déformant de manière à leur donner des surfaces très-différentes, il reconnut qu'elles tombaient avec des vitesses très-inégales. Il fut ainsi conduit à penser que la pesanteur agit effectivement sur tous les corps avec la même intensité, et que si on pouvait opérer dans le vide, tous les corps tomberaient avec la même vitesse.

Cette expérience n'était pas possible au temps de Galilée, la machine pneumatique n'étant pas encore inventée; elle fut réalisée par Newton et on la répète aujourd'hui dans tous les cours de

physique. On se sert à cet effet d'un tube de $1^m,50$ à 2 mètres de longueur, dans lequel on peut faire le vide. On a placé dans le tube des corps d'inégale densité, tels que des grains de plomb, de petits morceaux de papier, du duvet. Lorsque le tube est plein d'air et qu'on le retourne, on voit ces différents corps tomber avec des vitesses très-différentes, mais si on répète l'expérience après avoir fait le vide dans l'intérieur du tube, on ne peut reconnaître aucune différence entre la durée de leur chute.



Fig. 27.—Chute des corps dans le vide.

33. Lois de la chute. — Après avoir reconnu que l'effet de la pesanteur est le même sur tous les corps, Galilée se proposa de déterminer, en opérant sur l'un d'eux, suivant quelle loi se produit la chute. Mais l'observation de la chute libre présente de grandes difficultés, à cause de sa rapidité même; Galilée imagina de diminuer cette rapidité, sans toutefois altérer la loi physique du mouvement qu'il s'agissait d'étudier. Il eut recours pour cela au plan incliné.

Considérons, en effet (fig. 28), un corps pesant M, mobile le long du plan incliné ABC. Le poids du corps M étant représenté par MP, on peut, suivant ce qui a été dit (16), le décomposer en deux autres forces, l'une MN, perpendiculaire au plan et qui est détruite par la résistance du plan lui-même, l'autre MT, parallèle au plan, qui seule produit le mouvement. Or cette dernière force est plus petite que MP, mais elle en est une fraction constante, car dans tous les points du plan la figure de décomposition sera la même et les deux lignes MT et MP conserveront toujours le même rapport. On peut d'ailleurs calculer la grandeur de MT; en effet, dans le triangle MPT on a $MT = MP \sin MPT = MP \sin ABC$.

La force effective qui produit le mouvement est donc une fraction du poids représentée par le sinus de l'angle d'inclinaison du

plan avec l'horizon. Donc le mouvement sera moins rapide, mais sa loi restera évidemment la même et l'observation sera plus facile. La diminution de vitesse a en outre l'avantage d'atténuer l'importance relative de la résistance de l'air, qui croît très-rapidement à mesure que la vitesse augmente.

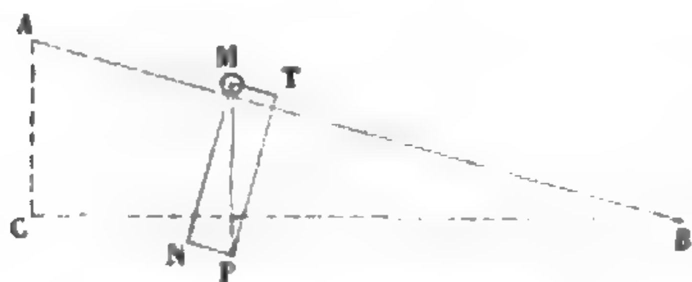


Fig. 28. — Plan incliné.

Le plan incliné employé par Galilée se composait d'une longue règle creusée en gouttière, dans l'intérieur de laquelle il faisait rouler une petite bille pesante. Ayant observé ainsi les espaces parcourus pendant 1, 2, 3 unités de temps, il reconnut que ces espaces étaient dans le rapport des nombres 1, 4, 9, c'est-à-dire que lorsque le temps de la chute devient double ou triple, l'espace parcouru devient 4 ou 9 fois plus grand. On peut énoncer cette loi en disant que *les espaces parcourus sont proportionnels au carré des temps employés à les parcourir*.

34. Machine d'Atwood. — Atwood, professeur à l'université de Cambridge, a imaginé, vers la fin du dernier siècle, une machine qui permet de vérifier les lois de la chute des corps avec beaucoup de précision. Elle a pour objet, comme le plan incliné de Galilée, de diminuer la vitesse de chute; mais ce résultat est obtenu par un procédé tout différent.

La machine se compose d'une colonne au sommet de laquelle est disposée une poulie très-mobile, qui forme la partie essentielle de l'appareil. Pour obtenir une plus grande mobilité de la poulie, on fait reposer les extrémités de son axe, non point sur des appuis fixes, mais sur les jantes croisées de deux poulies mobiles, ce qui a pour résultat de diminuer beaucoup le frottement. Autour de la poulie s'enroule un fil très-fin supportant à ses extrémités deux poids égaux P. Si l'on fait abstraction du poids du fil, il est clair que dans une position quelconque les deux poids doivent se faire équilibre. Mais, si l'on charge l'un des poids d'une masse additionnelle *p*, le système se mettra en mouvement. Or tous les points du système décrivant des lignes droites égales et parallèles, on peut imaginer que la force qui le sollicite est répartie uniformément

dans tous les points. Mais la seule force agissante est le poids p, de sorte que, si le système mobile forme une masse égale, par exemple, à 20 fois celle du poids p, chacun de ses points sera sollicité par une force 20 fois plus petite que si ce poids tombait seul. En général, si p est le poids additionnel et P le poids de chacune des masses égales, la force qui produit le mouvement du système sera diminuée, relativement à celle qui produit la chute libre, dans le rapport constant $\frac{p}{2P+p}$. La force est donc diminuée dans un rapport constant, comme dans le plan incliné, et par conséquent les lois du mouvement observé seront celles de la chute libre. Cela posé, les dispositions suivantes permettent d'étudier facilement le mouvement produit dans la machine.

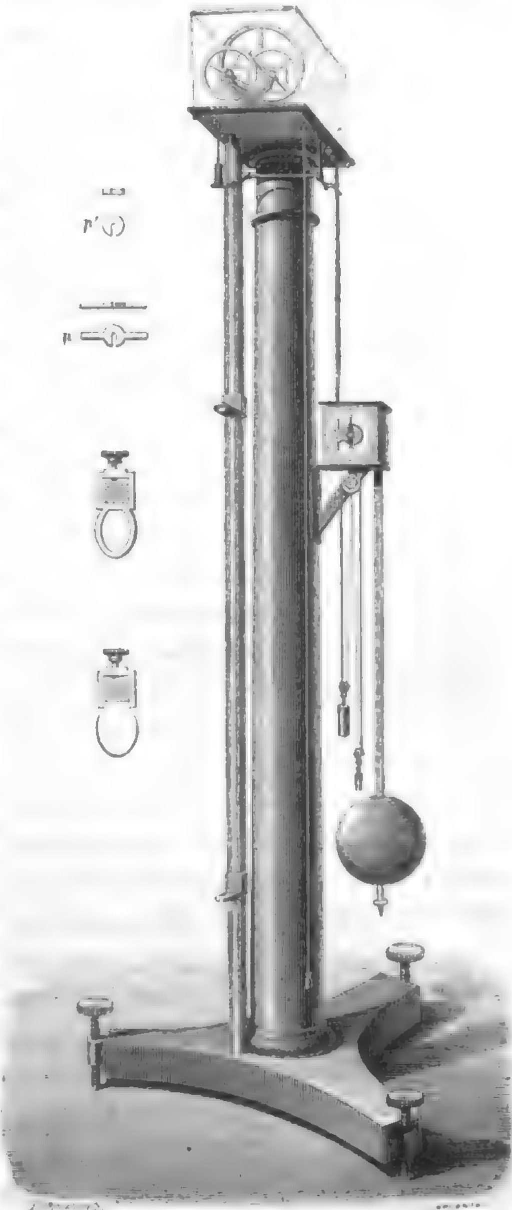


Fig. 29. — Machine d'Atwood.

L'un des poids se meut en regard d'une règle graduée, sur laquelle on peut arrêter à différentes hauteurs un curseur plan.

Une horloge à secondes sert à compter le temps. Pour mesurer l'espace parcouru pendant une seconde, on remonte le poids à l'origine de la graduation, on le charge de la masse additionnelle et on l'abandonne au moment où le pendule commence une oscillation. On place d'ailleurs le curseur en un point de la règle tel, qu'on entende simultanément le bruit du pendule achevant son oscillation et celui du corps qui vient frapper le curseur. Ce procédé est très-précis, car l'oreille s'apercevrait aisément du plus petit intervalle existant entre les deux bruits. On a donc très-exactement l'espace parcouru pendant une seconde. Pour être bien sûr que la chute commence à l'origine de l'oscillation du pendule, on dispose le poids sur une planchette M (fig. 30) qui est maintenue par l'extrémité du levier *aob* dont la partie inférieure s'appuie sur un excentrique fixé à la roue d'échappement de l'horloge. Supposons la roue tournant dans le sens indiqué par la flèche, l'extrémité *b*, qui glisse sur le profil de l'excentrique, arrive dans la position indiquée par la figure; alors, si le mouvement continue un peu, le point *b* cesse d'être soutenu et se trouve rejeté brusquement vers la gauche; par contre l'extrémité supérieure est rejetée vers la droite, la planchette M abandonnée à elle-même s'abaisse et la chute commence. Il suffit donc de caler l'excentrique de façon que ceci se produise au moment même de l'échappement d'une dent.



Fig. 30. — Détail de la détente.

Il est donc très-aisé de mesurer les espaces parcourus par le système mobile pendant 1, 2, 3 secondes. Si, par exemple, on constate que dans la première seconde l'espace parcouru est de 11 divisions, on trouve :

Espace parcouru pendant	2^s. . . .	$44 = 11 \times 2^2$
—	—	3^s. . . .	$99 = 11 \times 3^2$
—	—	4^s. . . .	$176 = 11 \times 4^2$

On voit donc que les espaces parcourus varient proportionnel-

lement au carré des temps employés à les parcourir. Si on désigne d'une manière générale par K l'espace parcouru pendant la première unité de temps, l'espace parcouru pendant le temps t sera donné par la formule

$$e = \mathrm{K}t^2. \qquad (1)$$

35. Vitesses. — La machine d'Atwood permet d'étudier les vitesses successives que la pesanteur imprime au système. Pour comprendre le moyen employé à cet effet, il faut donner une définition précise du mot *vitesse*.

Quand un point matériel se meut d'une manière uniforme, c'est-à-dire quand les espaces parcourus dans des temps égaux quelconques sont égaux, la notion de la vitesse est parfaitement claire : c'est l'espace parcouru pendant l'unité de temps. Ainsi, un point se mouvant uniformément parcourt 2, 3 mètres par seconde, on dit que sa vitesse est de 2, 3 mètres, la seconde étant prise pour unité de temps. Le mouvement uniforme se rencontre rarement dans la nature, et cela est tout naturel. En effet, un pareil mouvement ne peut exister que lorsque les forces agissantes sont nulles ou se font équilibre. Il se présente à l'esprit comme la vérification du principe de l'inertie ; mais lorsqu'un point est soumis à l'action incessante d'une force, celle-ci a évidemment pour résultat de modifier à chaque instant la valeur de l'espace parcouru, et par conséquent le mot vitesse a besoin d'une définition spéciale. A cet effet, on suppose qu'à un moment donné l'action de la force soit supprimée ; le mouvement devient uniforme, et la vitesse de ce mouvement uniforme est ce qu'on appelle la vitesse du point à l'instant considéré. On lui donne aussi le nom de vitesse acquise. La machine d'Atwood permet de supprimer à un moment donné l'action de la pesanteur. On dispose pour cela au point où arrive le mobile, au bout d'une seconde, un curseur annulaire qui laisse passer le poids, mais arrête la masse additionnelle à laquelle on donne pour cette expérience une forme allongée. A partir de ce moment, le poids ne se meut qu'en vertu de la vitesse acquise pendant la première seconde. On place le curseur plan au point où arrive le poids une seconde après ; l'intervalle compris entre les deux curseurs est la vitesse

acquise pendant la première seconde. En effectuant cette expérience dans les conditions où ont été supposées faites celles relatives aux espaces, on trouve que la vitesse acquise pendant la première seconde est représentée par 22 divisions. On opère ensuite en plaçant le curseur annulaire au point où arrive le système au bout de 2, 3 secondes, et le curseur plan au point où il arrive une seconde après; on mesure ainsi la vitesse acquise au bout de 2, 3 secondes, et on la trouve égale à 44 et 66 divisions. On voit donc que *les vitesses acquises varient proportionnellement au temps*. De plus, la vitesse acquise pendant une seconde 22 est le double de l'espace parcouru pendant la première seconde.

Dans la formule (1), K désigne l'espace parcouru pendant la première unité de temps; la vitesse acquise est donc 2 K, et par conséquent la vitesse acquise au bout du temps t est donnée par la formule

$$V = 2Kt. \qquad (2)$$

36. La machine d'Atwood ne laisse rien à désirer sous le rapport de l'exactitude, mais elle est d'une assez grande complication de construction et par suite d'un prix fort élevé. Nous donnons ici la figure d'une machine d'Atwood, modifiée par M. Bourbouze, qui est d'un emploi fort simple. AB est la poulie sur l'axe de laquelle se trouve un cylindre P que l'on entoure d'une feuille de papier enfumé. L'un des poids M en fer est retenu à la partie inférieure de l'appareil par l'action d'un électro-aimant animé par l'élément de pile O qu'on voit à gauche de la figure. De cette façon le poids M' chargé de sa masse additionnelle N ne peut obéir à l'action de la pesanteur. D'autre part, une lame vibrante L, qui s'appuie par un style très-léger sur le cylindre enfumé, est retenue par un électro-aimant E' animé par le même élément de pile. Si à un moment déterminé on interrompt le courant, le poids M' tombe, la lame vibre et décrit une certaine courbe ondulée sur la surface du cylindre. Les ondulations de cette courbe correspondent à des vibrations d'un corps élastique et par suite à des temps rigoureusement égaux; quant aux distances qui les séparent successivement, elles sont évidemment égales à la rotation du cylindre P et par suite proportion-

nelles au chemin parcouru par le système mobile. Or on remarque que ces distances varient exactement comme la suite des nombres 1, 4, 9, etc. L'anneau D est destiné à retenir, à un instant donné de la chute, la masse additionnelle N ; à partir de ce moment le mouvement devient uniforme et les ondulations de la courbe sont également espacées.

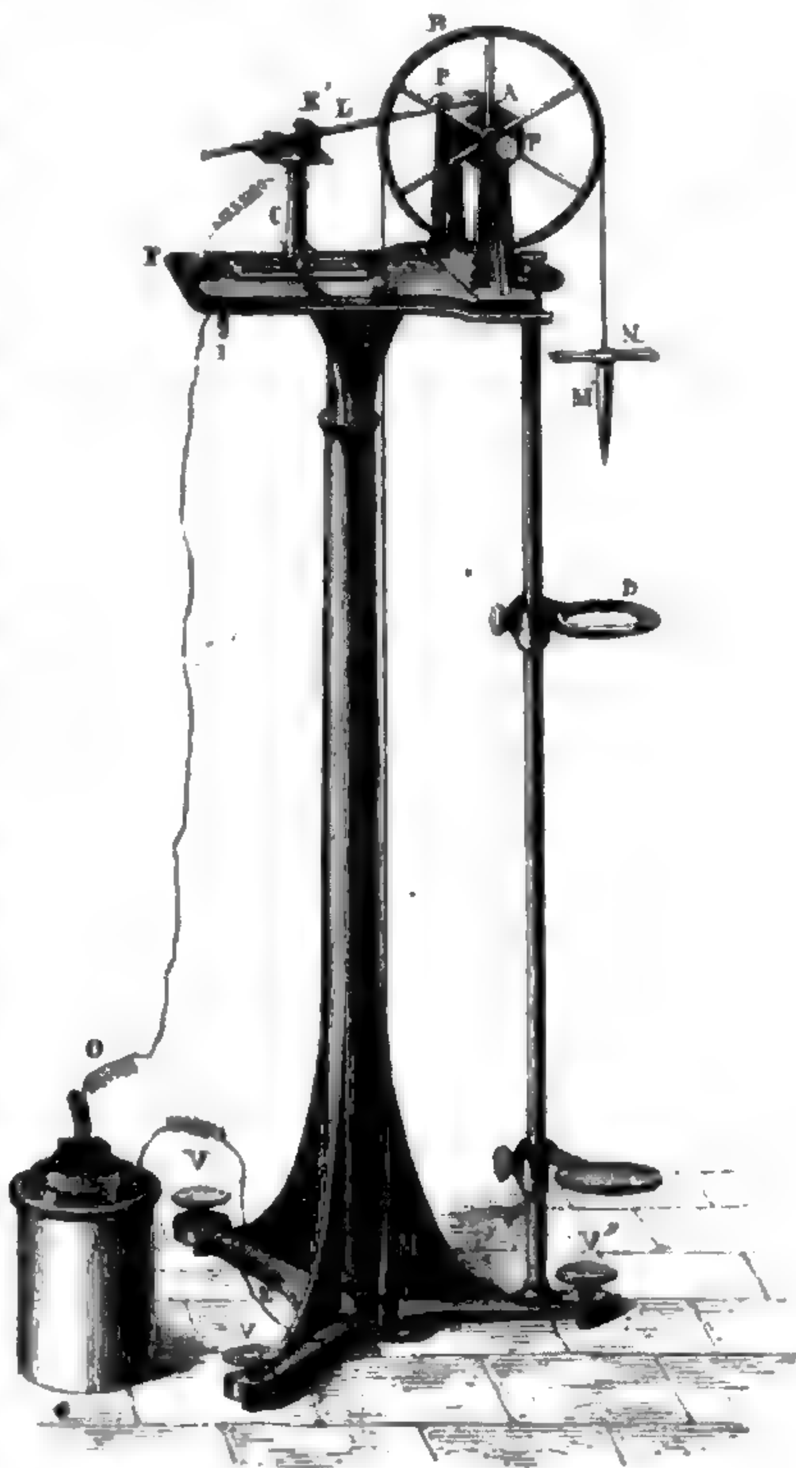


Fig. 31. — Machine d'Atwood modifiée par M. Bourbouze.

Quelle que soit la modification adoptée, la machine d'Atwood donne lieu à une expérience indirecte, puisqu'on n'observe pas le mouvement d'un corps tombant librement. Bien qu'il ne puisse résulter de cette circonstance aucune incertitude sur la légitimité des conclusions auxquelles on est conduit, il peut y avoir quelque intérêt à observer le phénomène même de la chute libre, et montrer que pendant toute sa durée les lois qui viennent d'être démontrées se vérifient. C'est là l'objet de l'appareil de M. Morin.

37. Appareil de M. Morin. — L'appareil de M. Morin se compose (fig. 32) d'un cylindre en bois recouvert de papier, qui peut recevoir un mouvement de rotation uniforme autour de son axe par la chute d'un assez gros poids. La corde qui supporte le poids est enroulée autour d'un tambour muni d'une roue dentée, laquelle engrène d'une part par l'intermédiaire d'une vis sans fin avec l'axe du cylindre, d'autre part avec un axe portant des ailettes destinées à régulariser le mouvement.

En regard du cylindre tournant se trouve un poids cylindro-conique en fonte qui porte un crayon dont la pointe s'appuie sur le papier, et qui est muni d'ailleurs d'oreilles glissant sur des fils verticaux destinés à le diriger dans sa chute. En appuyant sur un levier on peut faire tomber le poids à un moment déterminé; on attend pour cela que le mouvement du cylindre soit devenu sensiblement uniforme. Il résulte de cette disposition que, pendant son mouvement vertical, le crayon rencontrera les diverses génératrices du cylindre tournant et qu'il décrira par suite sur sa surface une certaine courbe, dont l'étude permet de remonter à la loi de la chute du corps qui l'a tracée. A cet effet, on décrit avec le crayon de l'appareil la circonférence qui passe par l'origine de la courbe, et la verticale correspondante au même point, on coupe la feuille de papier suivant cette dernière ligne, et on la développe, ainsi que le montre la fig. 33.

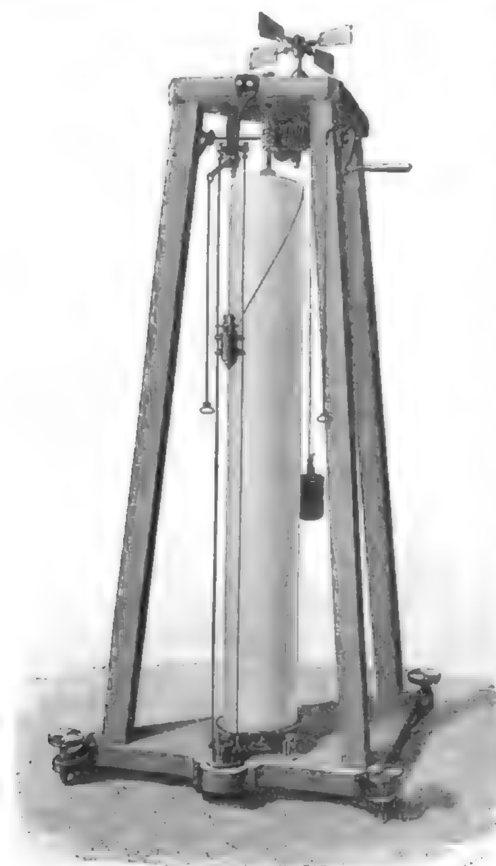


Fig. 32. — Appareil de M. Morin.

Si nous prenons sur la droite horizontale des distances égales 1, 2, 3, 4, 5..., et que nous abaissions les perpendiculaires correspondantes aboutissant à la courbe, il est évident que les points de celle-ci ont été tracés par le crayon lorsque le cylindre a tourné des quantités 1, 2, 3, 4... Les verticales correspondantes représentent

donc la longueur des espaces parcourus pendant les temps 1, 2, 3... Or on trouve, comme le montre la figure, que ces espaces sont représentés par les nombres 1, 4, 9... On vérifie donc que les espaces parcourus sont proportionnels aux carrés des temps employés à les parcourir.

Remarquons que des vérifications analogues peuvent être faites pour un très-grand nombre de points; elles établissent d'ailleurs une propriété purement géométrique de la courbe, c'est-à-dire que la longueur des lignes verticales croît proportionnellement au carré de celle des lignes horizontales. Cette propriété définit la *parabole*. Le tracé parabolique est donc la conséquence de la loi de la chute et dès lors ce tracé devient lui-même la preuve graphique de l'accroissement *continu* des espaces proportionnellement au carré du temps.

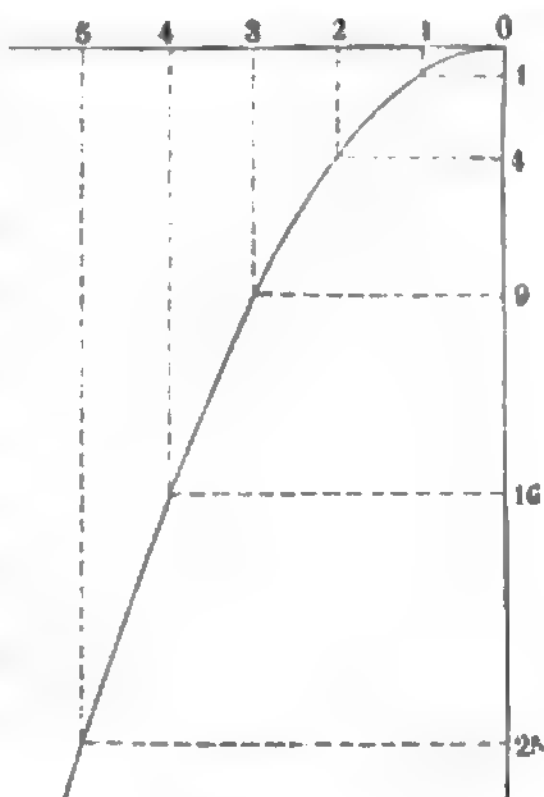


Fig. 33.

On pourrait aussi vérifier séparément, à l'aide de l'appareil de M. Morin, la loi des vitesses; nous ne décrirons pas la méthode qu'il faudrait employer pour cela, nous nous bornerons à dire que la loi des vitesses est en réalité une conséquence mécanique de celle des espaces [1].

38. Formules relatives à la chute des corps. — Les formules (1) et (2) caractérisent ce que l'on appelle en mécanique le mouvement uniformément accéléré; on peut donc conclure des expériences précédentes que la pesanteur imprime aux corps

1. Considérons, en effet, l'espace parcouru pendant un certain temps t, cet espace est donné par la formule $e = K t^2$; pendant le temps $t + \theta$ cet espace serait donné par l'expression $K(t+\theta)^2 = K t^2 + 2 K t \theta + K \theta^2$, d'où il suit que l'espace parcouru pendant le temps θ, après le temps t, est égal à $2 K t \theta + K \theta^2$. Si θ est très-petit, on pourra supposer approximativement le mouvement uniforme; dans ce cas la vitesse s'obtiendrait en divisant l'espace parcouru par le temps; elle serait donc égale à $\frac{2 K t \theta + K \theta^2}{\theta} = 2 K t + K \theta$. La supposition du mouvement uniforme pendant la durée du temps θ est erronée; mais elle le sera d'autant moins que θ sera plus petit. Si donc, dans la dernière expression, on suppose θ égal à zéro, on aura la valeur véritable de la vitesse, qui se trouve être égale à $2 K t$.

pesants un mouvement uniformément accéléré. Pour résoudre numériquement les diverses questions qui peuvent se présenter au sujet de la chute des corps, il suffit de connaître l'espace parcouru par un corps qui tombe pendant une seconde, ou la vitesse acquise au bout du même temps.

Les appareils qui viennent d'être décrits permettraient de faire cette détermination, mais avec peu de précision; une méthode beaucoup plus exacte est fournie par le pendule : elle sera indiquée dans le chapitre suivant.

On trouve ainsi qu'à Paris la vitesse acquise par un corps qui tombe pendant une seconde est de $9^m,8088$; on désigne ordinairement cette quantité par la lettre g, à laquelle on donne assez souvent le nom d'intensité de la pesanteur. Cette dénomination n'est pas correcte, puisque g s'exprime en unités de longueur et non point en unités de force; mais elle a un sens très-clair, car évidemment plus la force qui produit le mouvement est grande, plus est grande aussi la vitesse acquise au bout de l'unité de temps. Il y a même entre ces deux quantités un rapport de proportionnalité, ainsi que nous le verrons plus loin.

L'espace parcouru pendant la première seconde de la chute est égal à $\frac{1}{2}g$, c'est-à-dire à 4,9044.

Par l'introduction de la quantité g dans les formules (1) et (2), celles-ci deviennent :

$$e = \frac{1}{2}gt^2, \qquad (a)$$

$$v = gt. \qquad (b)$$

Éliminant t entre ces deux équations, on obtient une troisième formule très fréquemment employée qui fait connaître la vitesse acquise correspondante à un espace donné :

$$v = \sqrt{2ge}. \qquad (c)$$

39. *Applications*. — I. Calculer l'espace parcouru par un corps qui tombe pendant un nombre connu de secondes. Il suffit pour cela de se servir de la formule (a) en mettant à la place de t le nombre de secondes donné. En faisant le calcul jusqu'à 10 secondes, on forme le tableau suivant :

TEMPS DE LA CHUTE exprimé en secondes.	ESPACES parcourus.	TEMPS DE LA CHUTE exprimé en secondes.	ESPACES parcourus.
1.	4^m,905	6.	176^m,581
2	19^m,620	7.	240^m,345
3.	44^m,145	8.	313^m,920
4.	78^m,480	9.	397^m,305
5.	122^m,625	10.	490^m,500

II. Quel est le temps employé par un corps pour tomber d'une hauteur de 250 mètres, et quelle est la vitesse acquise au bas de la chute?

Les formules (*a*) et (*e*) donnent :

$$t = \sqrt{\frac{2e}{g}} = \sqrt{\frac{500}{9.8088}} = 7^s,1;$$

$$v = \sqrt{2ge} = \sqrt{2.9.8088.250} = 70^{\text{mèt.}}$$

III. De quelle hauteur devrait tomber un corps pour acquérir une vitesse de 500 mètres par seconde?

La formule (*e*) donne

$$e = \frac{v^2}{2g} = \frac{250000}{2.9,8088} = 12742^{\text{mèt.}}$$

La vitesse de 500 mètres par seconde est à peu près celle que possède un projectile quand il sort d'une bouche à feu; on voit qu'elle serait donnée par la pesanteur à un corps qui tomberait d'une hauteur de 13 kilomètres environ. La durée de la chute serait d'ailleurs d'à peu près 50 secondes. Il est bon de remarquer à ce sujet que les formules (*a*), (*b*), (*c*) ne sont relatives qu'à la chute dans le vide; dans l'air, surtout quand la vitesse est considérable, les résultats qu'elles fournissent sont très-éloignés de la vérité. D'ailleurs, quand on s'élève notablement au-dessus de la surface terrestre, la pesanteur elle-même change de valeur d'une manière sensible. On ne saurait donc se servir avec sûreté des formules précédentes que quand il s'agit de corps tombant d'une petite hauteur, et dans des conditions à n'éprouver qu'une faible résistance de la part de l'air.

La différence principale à noter entre la chute dans le vide et la chute dans l'air, c'est que dans ce dernier cas la vitesse, au lieu de croître indéfiniment, atteint une limite sensiblement constante, et d'autant plus vite que la surface du corps est plus grande et que sa densité est plus petite.

40. Force constante. — Nous venons de voir dans la pesanteur l'exemple d'une force qui imprime successivement à un corps des accroissements égaux de vitesse dans chaque unité de temps. On peut remarquer aussi que, dans chacune des unités de temps successives, l'espace parcouru dû à la nouvelle action de la force est toujours le même. En effet, soit a l'espace parcouru pendant la première seconde, l'espace parcouru pendant deux secondes est $4a$, et par suite l'espace parcouru pendant la deuxième seconde est $3a$. Or cet espace se compose de deux parties : de celui qui résulte de la vitesse acquise et qui est égal à $2a$, et de celui qui provient de l'action nouvelle de la force ; ce dernier est donc égal à a.

De même l'espace parcouru pendant la troisième seconde est $5a$; si on retranche l'espace $4a$ qui serait parcouru en vertu de la vitesse acquise pendant deux secondes, il reste encore a pour celui qui résulte de l'action nouvelle de la force, et ainsi de suite.

Il est naturel d'appeler force constante une force qui présente de pareils caractères ; nous pouvons donc dire que la pesanteur est une force constante.

D'autre part, du moment que l'esprit arrive à se faire une idée de la force, il peut concevoir *à priori* qu'une force soit constante, et on n'imagine pas qu'une pareille force puisse se manifester autrement qu'en produisant dans des temps égaux des accroissements égaux de vitesse et d'espace parcouru. Il suit de là qu'une force constante agissant sur un point matériel en repos lui imprimera un mouvement uniformément accéléré. Mais en acceptant cette conséquence on admet implicitement qu'une force produit sur un point matériel en mouvement le même effet que celui qu'elle produirait sur le point en repos. Ce n'est là au surplus qu'un cas particulier d'un principe plus général, se confondant d'ailleurs en partie avec celui de l'inertie :

Lorsqu'un système de points est entraîné par un mouvement

commun et que l'un d'eux vient à être sollicité par une force particulière, son mouvement relatif est indépendant du mouvement commun et par conséquent le même que si le système était en repos. C'est ainsi, par exemple, que dans un bateau, dans un wagon entraînés avec une vitesse plus ou moins grande, les mouvements particuliers qui peuvent être observés n'éprouvent aucune modification.

41. Proportionnalité des forces aux vitesses. — Il suit directement de ce principe que si une force F imprime à un point matériel une vitesse V au bout de l'unité de temps, une nouvelle force égale à F agissant sur le même point donnera lieu à une nouvelle vitesse V, de sorte que la vitesse totale sera 2 V. On désigne ordinairement sous le nom d'accélération d'une force constante l'accroissement de vitesse qu'elle imprime à un point matériel par chaque unité de temps. On peut donc dire que les forces appliquées à un point matériel sont proportionnelles aux accélérations qu'elles produisent, ou en général aux vitesses qu'elles font acquérir dans le même temps.

Quelques auteurs ont cherché à établir *à priori* la légitimité de cette relation, mais c'est là évidemment une entreprise vaine. Nous ne savons rien, en effet, sur la nature intime des forces, nous ne connaissons que leurs effets, et nous disons qu'elles sont égales lorsqu'elles donnent lieu à un phénomène physique identique. C'est ainsi, par exemple, qu'un poids qui fléchit le dynamomètre au même degré qu'un certain effort musculaire constitue une force équivalente ou égale. On ne saurait donc établir aucun lien nécessaire entre la cause que nous appelons force et l'effet qu'elle produit, puisque c'est cet effet seul que nous connaissons.

42. Masse des corps. — Si un même corps est sollicité par diverses forces F, F', F''.... qui lui impriment au bout de l'unité de temps des vitesses V, V', V''...., on aura d'après ce qui précède :

$$\frac{F}{V} = \frac{F'}{V'} = \frac{F''}{V''} = \ldots.$$

Si P est le poids du corps considéré, on sait qu'il produit au bout de l'unité de temps une vitesse égale g; on aura donc

$$\frac{F}{V} = \frac{F'}{V'} = \frac{F''}{V''} = \ldots \frac{P}{g} = M.$$

Les mêmes forces agissant dans le même lieu sur un corps de

poids P' donneraient lieu à des vitesses différentes V_1, V'_1, V''_1..., et on aurait de même les relations

$$\frac{F}{V_1} = \frac{F'}{V'_1} = \frac{F''}{V''_1} \dots = \frac{P'}{g} = M'.$$

Ce fait que les mêmes forces, appliquées à des corps différents, donnent lieu à des vitesses différentes est l'origine de l'idée de masse. Un corps a une masse plus grande qu'un autre, ou, comme on dit en physique, il renferme plus de matière, lorsque la même force lui imprime une vitesse plus petite, et réciproquement. En tout cas, quotient de la force par l'accélération produite définit le corps au point de vue de la masse, on peut le prendre pour la mesure de cette dernière quantité, et l'on voit ainsi qu'une force quelconque pourra être mesurée par le produit de la masse sur laquelle elle agit et de la vitesse qu'elle lui imprime au bout de l'unité de temps.

Si nous considérons en particulier le poids d'un corps, on aura, entre ce poids, la masse et l'accélération de la pesanteur, la relation fondamentale

$$P = Mg.$$

Cette formule nous montre que dans le même lieu le poids est proportionnel à la masse, parce que g a la même valeur pour tous les corps. Il n'en est pas de même quand on passe d'un lieu à un autre ; mais comme après tout les variations sont extrêmement petites, en réalité la masse et le poids sont deux quantités toujours sensiblement dans le même rapport, et souvent on donne aux deux mots la même signification. Toutefois il faut se rappeler que ces deux expressions correspondent à des notions distinctes, et, abstraction faite de toute évaluation numérique, la masse d'un corps est quelque chose qui lui est propre et qui est indépendant du poids. La pesanteur n'existerait pas qu'il n'en serait pas moins vrai qu'une sphère de plomb a une masse plus grande qu'une sphère de liége de même diamètre. Nous reconnaissons ce fait ordinairement à ce que le poids de la première sphère est plus grand que celui de la seconde ; mais à défaut de la pesanteur, l'emploi de toute autre force pourrait nous conduire au même résultat.

CHAPITRE VI.

PENDULE.

43. Pendule. — Lorsqu'un corps est suspendu par un axe de rotation qui ne passe pas son centre de gravité, il ne saurait être en équilibre stable que lorsque le centre de gravité est au-dessous de l'axe et dans le même plan vertical (28). Si cette condition n'est pas satisfaite, le corps oscille de part et d'autre de cette position d'équilibre jusqu'à ce que la résistance de l'air et le frottement sur l'axe de suspension aient anéanti son mouvement. Un corps suspendu de la sorte, quelle que soit sa forme d'ailleurs, est ce que l'on appelle un pendule. Il est formé assez ordinairement d'une tige qui peut se mouvoir à la partie supérieure autour d'un axe O et qui porte inférieurement une lourde lentille M; celle-ci peut être élevée plus ou moins par le moyen de la vis V. Les applications du pendule sont des plus importantes : c'est lui qui sert de régulateur dans les horloges, c'est à son aide qu'on a pu mesurer l'intensité de la pesanteur et constater ses variations dans les différents lieux du globe; il est donc important de connaître au moins les points fondamentaux de sa théorie. Pour cela nous aurons recours à la considération d'un pendule idéal, que l'on nomme en mécanique le *pendule simple*.

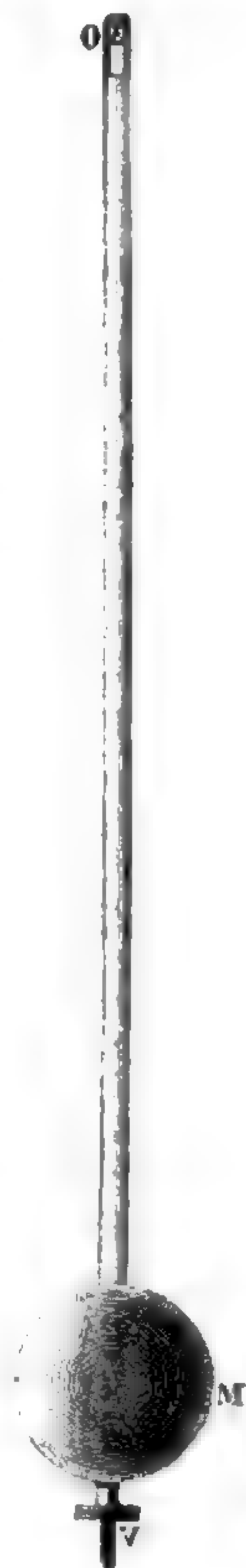


Fig. 34.
Pendule.

44. Pendule simple. — On appelle pendule simple un pendule formé par une molécule pesante

M suspendue à l'une des extrémités d'un fil inextensible et sans poids, dont l'autre extrémité est fixée en A. Lorsque le fil est vertical, le poids de la molécule agissant suivant la direction même du fil, il y a équilibre. Mais supposons qu'on l'amène dans une position telle que AM. Dans ce cas, le poids MG de la molécule peut être décomposé en deux forces, MC et MH. La première, dirigée suivant le prolongement du fil, est détruite par la résistance de celui-ci; l'autre, dirigée suivant la tangente MH, produit le mouvement de la molécule. Cette composante efficace est évidemment d'autant plus grande que l'angle d'écart est lui-même plus grand. Le point matériel se mouvra donc suivant l'arc de cercle dont le centre est en A, et, à mesure qu'il s'approchera de la verticale AM', la force qui le sollicite ira en diminuant. Lorsqu'il est arrivé en M', la force est nulle; mais en vertu de la vitesse acquise il s'élèvera de l'autre côté et subira en sens contraire les actions de la pesanteur telles qu'elles se sont produites dans la partie MM'. Il faut donc, pour que la totalité de la vitesse imprimée par la pesanteur soit annulée, que la molécule s'élève jusqu'en M'', point situé à la même hauteur que M. De M'' elle redescend pour exécuter autour de la verticale AM' une série d'oscillations d'égale amplitude et par suite d'égale durée.

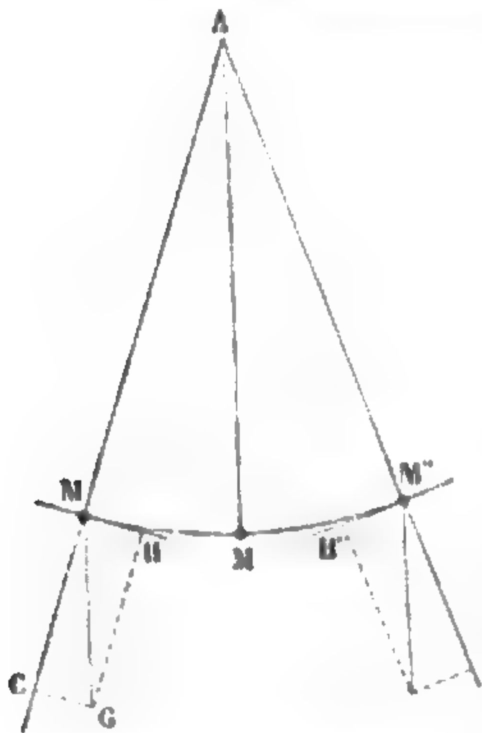


Fig. 35. — Mouvement du pendule simple.

Lorsque l'amplitude change, la durée de l'oscillation change aussi et dans le même sens; mais lorsque cette amplitude est très-petite, quand elle ne dépasse pas par exemple 10 ou 15 degrés, on démontre que l'oscillation a très-sensiblement la même durée. C'est en cela que consiste la loi de l'*isochronisme.*

Dans ce cas particulier, où les oscillations ont une petite amplitude, on peut exprimer sa durée constante par la formule suivante :

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

dans laquelle l désigne la longueur du pendule, g l'accélération de la pesanteur et π le rapport de la circonférence au diamètre.

On voit d'après cette formule que la durée de l'oscillation varie proportionnellement à la racine carrée de la longueur du pendule, de sorte que si cette longueur devient 4, 9, 16 fois plus considérable, la durée de l'oscillation sera double, triple ou quadruple.

45. Lois expérimentales du mouvement du pendule. — Les lois précédentes se rapportent au pendule simple, c'est-à-dire à un appareil idéal ; mais elles s'appliquent dans une certaine mesure aux pendules ordinaires que, par comparaison avec le pendule simple, on nomme pendules composés. La découverte des lois expérimentales du mouvement pendulaire a même de beaucoup précédé sur ce point la théorie. C'est la première et on peut dire l'une des plus belles découvertes de Galilée ; elle date de l'année 1582, alors que cet illustre savant était à peine âgé de vingt ans. On raconte que, se trouvant un jour dans l'église métropolitaine de Pise, il fut frappé de la régularité des oscillations d'une lampe suspendue à la voûte et il lui parut que ces oscillations, tout en diminuant d'étendue, conservaient la même durée. Il soumit le fait à des expériences réitérées qui lui en confirmèrent la parfaite exactitude. On peut facilement vérifier cette loi de l'isochronisme : il suffit de compter le temps nécessaire pour un certain nombre d'oscillations à des moments où l'amplitude est différente ; on trouve qu'il est exactement le même. Ce résultat se vérifiera pour les plus petites oscillations, alors même qu'elles seront devenues tellement petites qu'on ne peut plus les discerner qu'à la loupe.

La durée de l'oscillation, qui ne dépend pas de l'amplitude, ne dépend pas non plus de la matière qui forme le pendule. C'est une conséquence facile à déduire de ce fait que la pesanteur agit de la même manière sur tous les corps. On constate en effet que de petites boules égales, de plomb, de cuivre, d'ivoire, etc., suspendues à l'extrémité de fils d'égale longueur, oscillent dans le même temps, pourvu qu'elles aient assez de masse pour vaincre facilement la résistance de l'air. C'est un résultat tout à fait semblable à celui de l'expérience de Galilée sur la chute des corps (32) ; on peut en

conclure avec certitude que dans le vide ces divers pendules oscilleraient rigoureusement avec la même vitesse.

En employant des boules suspendues à des fils de longueurs différentes, Galilée reconnut l'influence de la longueur du fil et parvint à en découvrir la loi. Il constata ainsi que quand la longueur augmente, la durée de l'oscillation augmente aussi, non pas proportionnellement à la longueur du fil, mais proportionnellement à la racine carrée de cette longueur ; c'est-à-dire que pour une longueur quadruple la durée de l'oscillation est double ; elle est triple pour une longueur neuf fois plus grande, et ainsi de suite.

Ainsi, sachant que la durée du pendule qui bat la seconde à Paris est d'environ 1 mètre ($0^m,994$), on voit qu'un pendule qui aurait 64 mètres de longueur effectuerait son oscillation en 8 secondes. C'était à peu près la longueur du pendule établi par M. Foucault au Panthéon, dans ses expériences célèbres sur la rotation de la terre. Cette loi des longueurs, découverte par Galilée, est précisément celle que donne la formule du pendule simple ; cela est facile à comprendre, car un appareil formé d'une petite boule suspendue à un fil mince peut en quelque sorte être assimilé à un pendule simple. Mais quand la forme du pendule est différente et plus ou moins compliquée, on ne sait plus alors la signification exacte du mot longueur, il faut avoir recours à la théorie mécanique de l'appareil, et nous allons sur ce point donner quelques explications.

46. Pendule simple correspondant. — On démontre en mécanique que, quelle que soit la forme du pendule, il y a toujours un pendule simple qui oscillerait exactement de la même manière ; c'est ce que l'on appelle le pendule simple correspondant ou synchrone. Si, à une distance de l'axe de suspension égale à cette longueur, on suppose une ligne parallèle à cet axe, cette ligne porte le nom d'*axe d'oscillation ;* elle peut se trouver dans l'intérieur du pendule, mais elle peut se trouver aussi au dehors ; cela dépend de la forme du corps oscillant, de ses dimensions, de la manière dont varie la densité dans son intérieur et enfin de la position de l'axe de suspension.

Dans tous les cas, l'axe de suspension et l'axe d'oscillation jouis-

sent d'une propriété curieuse : si l'on imagine qu'après avoir fait osciller le pendule autour de l'axe de suspension, on le fasse osciller autour de l'axe d'oscillation (quand celui-ci est en dehors du corps, il faut le supposer invariablement lié avec lui), on trouvera une oscillation rigoureusement de même durée. C'est ce qu'on exprime en disant que l'axe d'oscillation et l'axe de suspension sont réciproques. Cette importante propriété a été découverte par Huyghens.

Nous voyons d'après ce qui précède que les lois du pendule simple sont applicables à un pendule quelconque; mais il faudra entendre par longueur, la longueur du pendule simple correspondant, c'est-à-dire la distance entre l'axe de suspension et l'axe d'oscillation.

47. Détermination de g.—Revenons actuellement à la formule du pendule simple $T = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. On en déduit aisément $g = \frac{\pi^2 l}{T^2}$, d'où il suit qu'il suffirait pour déterminer la valeur de g de faire osciller un appareil de ce genre et de mesurer exactement T et l.

En réalité il suffit de faire osciller un pendule composé quelconque, pourvu que dans la formule on mette à la place de l la longueur du pendule simple correspondant. Cette longueur peut être déterminée en faisant usage des formules que la mécanique fait connaître sur ce sujet. On peut aussi utiliser la réciprocité des axes de suspension et d'oscillation en se servant d'un pendule dit réversible, dont la première idée est due au savant français de Prony. Il y a dans l'appareil deux couteaux de suspension : l'un d'eux est fixe, l'autre est mobile et peut être arrêté aux différents points d'une rainure, sur les bords de laquelle se trouve une graduation. Après avoir fait osciller le pendule autour du premier axe, on le fait osciller autour du second et on fait varier la position de celui-ci jusqu'à ce que la durée de l'oscillation soit la même. La longueur du pendule simple est alors la distance qui sépare les arêtes des deux couteaux.

48. Variations de l'intensité de la pesanteur. — Les expériences pendulaires ont été multipliées à la surface du globe, elles ont conduit à ce résultat, que l'intensité de la pesanteur varie d'un point de la terre à l'autre. A Paris la valeur de g est égale à $9^m,8088$ (Borda); elle augmente quand on s'approche du pôle et diminue

quand on va vers l'équateur. Ces variations ne sont pas d'ailleurs très-considérables, ainsi que le montre le tableau suivant :

Pesanteur à l'équateur.	9,7815
Accroissement de l'équateur aux pôles. . . .	0,0512
Pesanteur aux pôles.	9,8327
Pesanteur moyenne.	9,8061

Il suit de là que le poids d'un corps n'est pas le même dans les différents points du globe; il varie évidemment dans le même rapport que l'intensité de la pesanteur, et il y a des circonstances où il peut être nécessaire de tenir compte de ces variations; mais on les néglige complétement dans la plupart des applications.

49. Force centrifuge. — Il y a deux causes distinctes de ces variations de l'intensité de la pesanteur : la première est ce qu'on appelle la *force centrifuge*. Considérons un point matériel M retenu à l'extrémité d'un fil OM et supposons qu'on lui imprime une certaine impulsion. A chaque instant, en vertu de l'inertie, le point tend à se mouvoir suivant la tangente au cercle; mais le fil empêche ce mouvement de se produire en tirant le point qui réagit à son tour sur lui et lui imprime une certaine tension à laquelle on a donné le nom de *force centrifuge*. Il est clair que l'on pourrait par la pensée supprimer le fil, pourvu qu'on supposât au point O une force de grandeur convenable. Cette force, qui, combinée avec l'impulsion initiale, produirait le mouvement circulaire, porte le nom de *force centripète,* et il est évident qu'elle est égale et opposée à la force centrifuge.

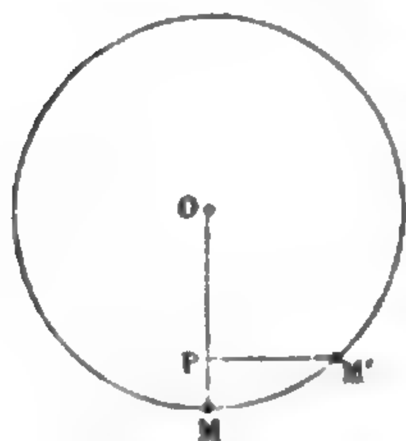


Fig. 36. — Force centrifuge.

Il est facile de calculer la valeur de la force centripète. Supposons qu'à un certain moment le point M soit uniquement soumis à son action, il parcourrait sur le rayon une longueur MP dans un petit temps t. Soumis à la fois à la vitesse acquise et à la force centripète, il se meut sur le cercle et parcourt dans le même temps l'arc MM'; mais en vertu du principe des mouvements relatifs, la projection de cet arc sur le diamètre OM est précisément MP.

Or, si l'on appelle φ l'accélération de la force centripète, cette force pouvant être considérée comme constante dans le temps t, on doit avoir (39) $MP = \frac{\varphi t^2}{2}$, d'où $\varphi = \frac{2\,MP}{t^2}$. Mais, en désignant par v la vitesse au moment considéré et r le rayon du cercle, on a $MM' = vt$ et comme l'arc MM' peut être confondu avec sa corde, $\overline{MM'}^2 = v^2 t^2 = MP.\,2\,r$, d'où $MP = \frac{v^2 t^2}{2\,r}$ et par suite $\varphi = \frac{v^2}{r}$. On voit par cette formule que la force centripète et par suite la force centrifuge varient proportionnellement au carré de la vitesse. Pour avoir la grandeur de la force, il faut multiplier l'accélération par la masse, ce qui donne $F = \frac{mv^2}{r} = \frac{p}{g} \cdot \frac{v^2}{r}$, p désignant le poids du point matériel.

Lorsque le mouvement circulaire est uniforme, on peut donner à la formule de la force centrifuge une expression plus commode. En effet, si on désigne par T la durée de la révolution, la vitesse v est égale à $\frac{2\pi r}{T}$ et par suite l'expression $\frac{v^2}{r}$ devient $\varphi = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$.

Supposons, par exemple, un poids de 50 grammes fixé à l'extrémité d'un fil de $0^m,80$ et animé d'une vitesse de rotation de 40 tours par minute. La force centrifuge développée a pour expression

$$\frac{0^k,050}{9,8088}\left(\frac{4\pi^2.0,80.40^2}{60^2}\right) = 714^{gr.}$$

Si la cohésion était inférieure à 714 grammes, le fil se romprait et le corps rendu libre s'échapperait suivant la tangente au dernier élément du cercle décrit.

50. Effets divers de la force centrifuge. — On fait dans les cours de physique diverses expériences sur la force centrifuge. Ainsi, par exemple, on prend une tringle AB (fig. 37) qui passe à travers deux billes d'ivoire M et M' et à l'aide du mécanisme que représente la figure, on imprime à l'appareil un mouvement de rotation plus ou moins rapide ; on voit alors les billes s'échapper vers les extrémités de la tringle. Si l'on a placé un ressort du côté de la boule M' par exemple, celui-ci est pressé avec une force qui est précisément égale à chaque instant à la valeur de la force centrifuge.

Le chemin de fer à force centrifuge (fig. 38) nous montre un effet curieux de cette force. Un wagon partant du point A descend sur des rails inclinés AB, se relève en suivant leur tracé qui forme un contour d'hélice, et vient finalement s'arrêter en D. Il y a donc un

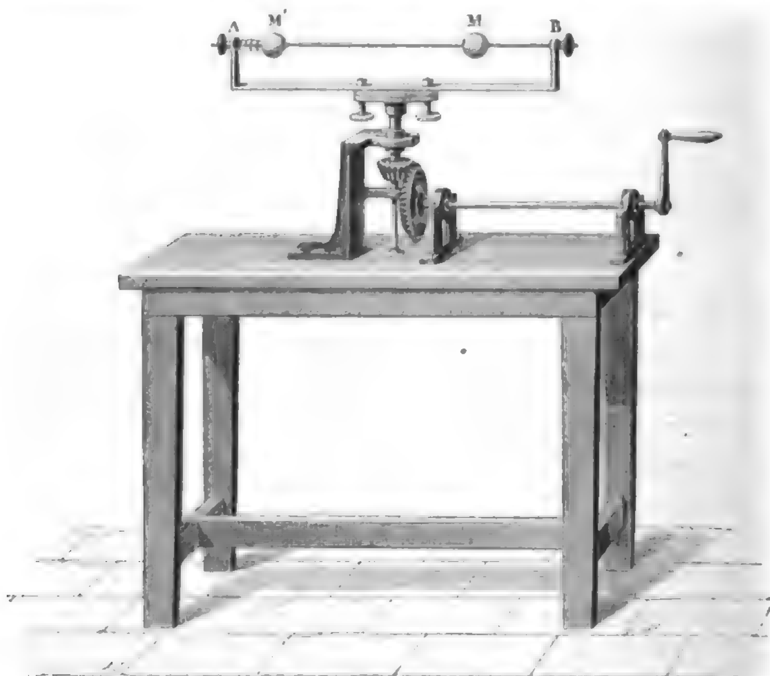


Fig. 37. — Appareil de la force centrifuge.

moment où le wagon situé en C à la partie supérieure de la portion curviligne est soutenu contrairement à l'action de la pesanteur. Rien de plus simple à comprendre. Le wagon, à raison de son mouvement sur la première portion inclinée, a reçu une certaine vitesse. En vertu de l'inertie il tend à se mouvoir avec cette vitesse d'une façon rectiligne; mais, obligé de suivre les rails courbes qui lui sont offerts, il réagit sur eux avec une force dont la valeur est précisément donnée par la formule trouvée plus haut. Si le point A est assez élevé au-dessus du point D, cette force pourra précisément équilibrer le poids du wagon et celui-ci ne tombera pas. On démontre aisément qu'il faut pour cela que la hauteur du point A surpasse celle du point D d'au moins 1/5.

Si l'on monte sur l'appareil une sorte de sphère formée par quatre ressorts flexibles en acier (fig. 39), et qu'on la fasse tourner rapidement, on la voit s'aplatir d'une façon d'autant plus prononcée

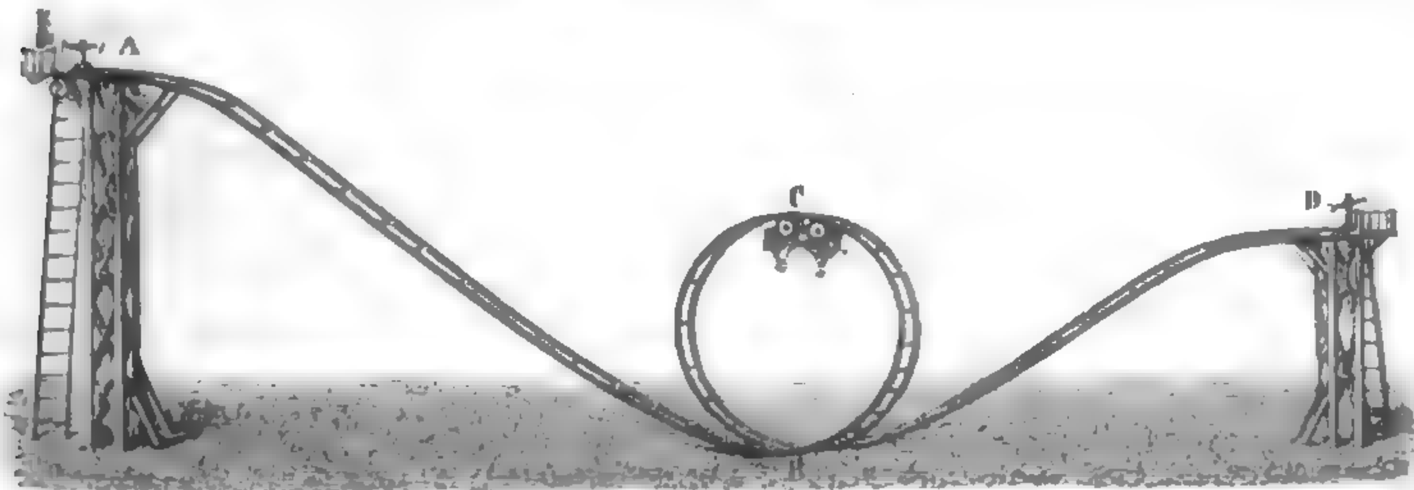


Fig. 38. — Chemin de fer à force centrifuge.

que la rotation est plus rapide. C'est un effet de la force centrifuge qui, plus grande dans les points où la rotation est plus rapide, doit nécessairement produire un renflement dans cette région. On considère cette expérience comme montrant la manière dont la terre autrefois fluide s'est renflée à l'équateur et aplatie vers les pôles.

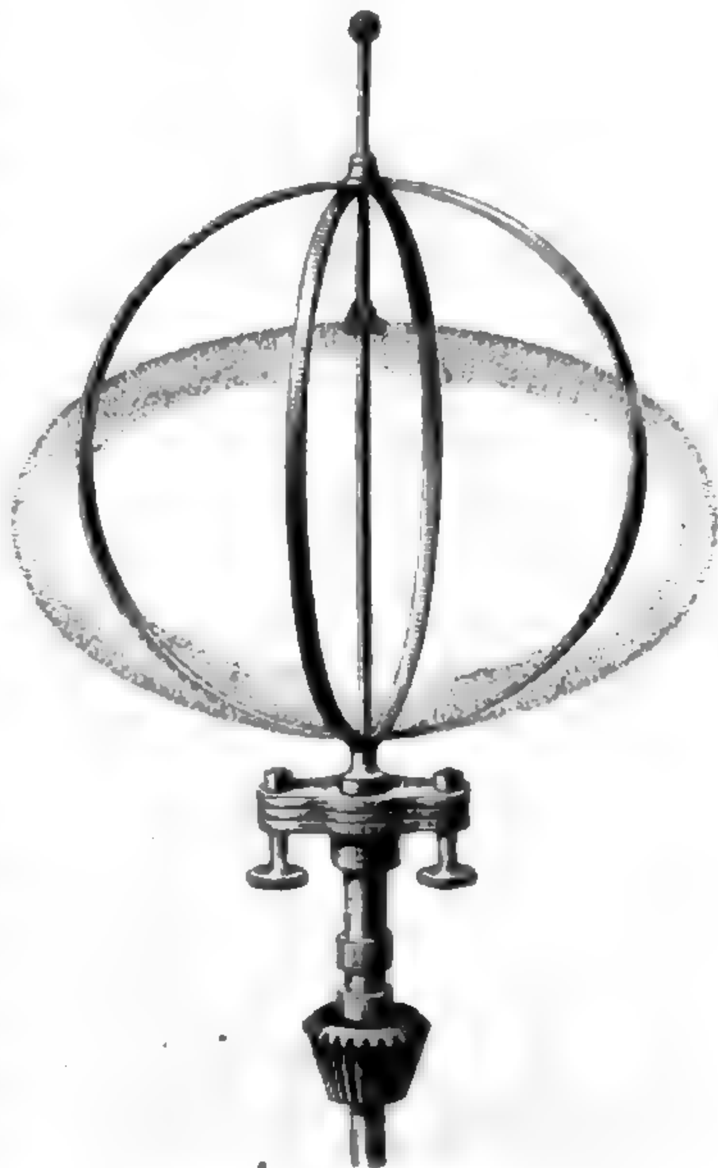


Fig. 39. — Aplatissement de la terre.

51. L'influence de la force centrifuge sur la pesanteur se déduit aisément de ce qui précède. Les différents corps qui sont à la surface de la terre sont retenus sur elle par la pesanteur, et c'est à cause de ce lien physique qu'ils décrivent un mouvement circulaire. Ils réagissent donc d'une quantité qui est précisément égale à la force centrifuge, et il en résulte une diminution correspondante de la pesanteur.

A l'équateur la force centrifuge est directement opposée à la pesanteur, et la diminue de toute sa valeur. Cette valeur est

d'ailleurs facile à calculer. Appelons en effet r le rayon terrestre et T la durée du jour sidéral qui est la durée même de la rotation de la terre, l'expression de la force centrifuge est, d'après ce qui vient d'être dit, $\frac{4\pi^2 r}{T^2} = \frac{2\pi r . \pi}{T^2}$. Mettons à la place de $2\pi R$ 40,000,000 de mètres et remplaçons T par sa valeur 86,164'', on a pour la valeur cherchée $0^m,033$. Ce nombre est sensiblement la 289e partie de g; on en conclut qu'à l'équateur la force centrifuge est diminuée d'environ $\frac{1}{289}$.

On peut remarquer que 289 est le carré de 17; et comme la force centrifuge varie proportionnellement au carré de la vitesse, on en conclut que si la terre tournait 17 fois plus vite, à l'équateur les corps n'auraient pas de poids.

A mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, d'une part la force centrifuge diminue puisque la vitesse de rotation est moindre, d'autre part elle n'est plus directement opposée à la pesanteur et ne diminue celle-ci que d'une partie de sa valeur. Par cette double raison la pesanteur doit être moins diminuée, et il est par conséquent bien démontré que, par suite de l'influence de la force centrifuge, la pesanteur doit décroître à mesure qu'on s'approche de l'équateur.

Ajoutons que la force centrifuge n'influe pas seulement sur l'intensité de la pesanteur, elle modifie aussi sa direction. L'angle que fait la verticale réelle avec celle qui aurait lieu si la terre était en repos varie d'une latitude à l'autre ; à Paris, où sa valeur est à peu près maxima, elle est de 5 à 6 minutes.

52. Gravitation universelle. — La pesanteur n'est qu'un cas particulier de l'attraction ou de la gravitation universelle. Newton a établi, par des recherches poursuivies pendant plus de vingt-cinq ans, que le mouvement des planètes autour du soleil, celui des satellites autour des planètes, pouvaient s'expliquer en admettant qu'il existe entre ces différents corps une attraction mutuelle qui, combinée avec une impulsion initiale, détermine la trajectoire généralement elliptique que décrivent ces différents corps. Cette attraction est proportionnelle à la masse des corps agissant l'un sur l'autre, elle varie en raison inverse du carré de la distance qui les

sépare. Personne n'ignore qu'à l'aide de ce système, non-seulement les astronomes sont parvenus à expliquer toutes les particularités du système solaire, mais qu'ils peuvent calculer et prévoir à l'avance les diverses positions des corps célestes à une époque quelconque et avec une merveilleuse exactitude. Grâce à l'attraction, l'étude des mouvements des astres est devenue une partie de la mécanique rationnelle, qui à raison de son objet spécial a reçu le nom de mécanique céleste.

Il est dès lors tout naturel de considérer la pesanteur comme un cas particulier de l'attraction universelle. La chute d'un corps n'est donc que le résultat de l'attraction qu'exercent sur lui les diverses parties du globe terrestre. Les preuves de cette identité sont d'ailleurs surabondantes. Si la pesanteur n'est en effet que la résultante de l'attraction terrestre, celle-ci doit évidemment, d'après la symétrie de l'action produite, être dirigée suivant le rayon terrestre; c'est ce que l'expérience confirme d'une manière générale. On démontre en mécanique que non-seulement l'attraction d'une sphère sur un point extérieur est dirigée suivant le rayon, mais qu'elle est la même que si toute la masse était réunie au centre. Il suit de là et de ce que la terre est un peu aplatie aux pôles, que l'intensité de la pesanteur devra diminuer à mesure qu'on ira du pôle vers l'équateur. De plus, la figure de la terre étant connue, on pourra, en prenant pour base l'attraction, étudier *à priori* la loi des variations de la pesanteur, en tenant compte des effets de la force centrifuge. On arrive ainsi à la loi qui résulte des observations pendulaires, c'est-à-dire que la pesanteur varie proportionnellement au carré du sinus de la latitude.

L'hypothèse de l'attraction explique donc tous les phénomènes de la pesanteur; ajoutons qu'on peut en fait démontrer sur la surface de la terre la réalité physique de l'attraction. Ainsi on a pu constater que dans le voisinage des montagnes le fil à plomb est dévié; Cavendish a pu mettre en évidence par un appareil extrêmement sensible l'attraction qu'exercent deux grosses sphères de plomb sur des sphères beaucoup plus petites; il a même déduit de cette action, comparée à celle qu'exerce le globe, la densité moyenne de celui-ci, qu'il a trouvée égale à 5,5.

53. Il résulte de l'identité entre l'attraction et la pesanteur que cette dernière force n'est pas rigoureusement constante, comme semblent le démontrer les expériences que nous avons indiquées. Ainsi, à mesure qu'un corps tombe, sa distance au centre de la terre diminue et la force qui le sollicite augmente. Mais les hauteurs sur lesquelles nous pouvons expérimenter sont tellement petites par rapport au rayon terrestre, que les variations de la force motrice sont absolument inappréciables. Il n'en est pas de même quand on considère un point notablement éloigné de la surface de la terre; alors cette variation devient sensible. Ainsi il est très-facile de constater la différence d'intensité de la pesanteur au sommet et à la base d'une montagne.

Quand un point pénètre dans l'intérieur du globe, la loi de l'action qu'il subit devient plus complexe. Si la terre était homogène, l'attraction devrait diminuer d'une manière continue, et on démontre qu'en chaque point elle serait proportionnelle à la distance au centre. Mais la densité du globe va en croissant à mesure qu'on s'avance; cela résulte de ce que la densité moyenne est égale à 5,5 environ, tandis que les couches superficielles ont une densité qui n'atteint pas 3. Cette augmentation de densité tend à augmenter la force attractive. La prédominance de l'une ou de l'autre de ces actions inverses dépend de la loi même suivant laquelle varie la densité. Or l'expérience a montré que dans les premières couches c'est la seconde action qui l'emporte. Ainsi M. Airy ayant déterminé l'intensité de la pesanteur au fond d'un puits de mine de 385 mètres de hauteur, l'a trouvée plus considérable qu'à la surface du globe, de $\frac{1}{19190}$ environ.

Il faut donc admettre qu'à l'intérieur du globe la pesanteur va en augmentant jusqu'à une certaine distance; elle diminue ensuite, jusqu'à un certain point où elle a la même valeur qu'à la surface et, continuant à diminuer, elle devient évidemment nulle au centre, où toutes les forces attractives s'équilibrent mutuellement.

CHAPITRE VII.

BALANCE.

54. La balance a pour objet la mesure du poids des corps. Elle se compose essentiellement d'un levier rigide AB appelé fléau, mobile autour d'un axe central O. Cet axe repose sur un plan d'appui, et comme il se trouve un peu au-dessus du centre de gravité, le fléau

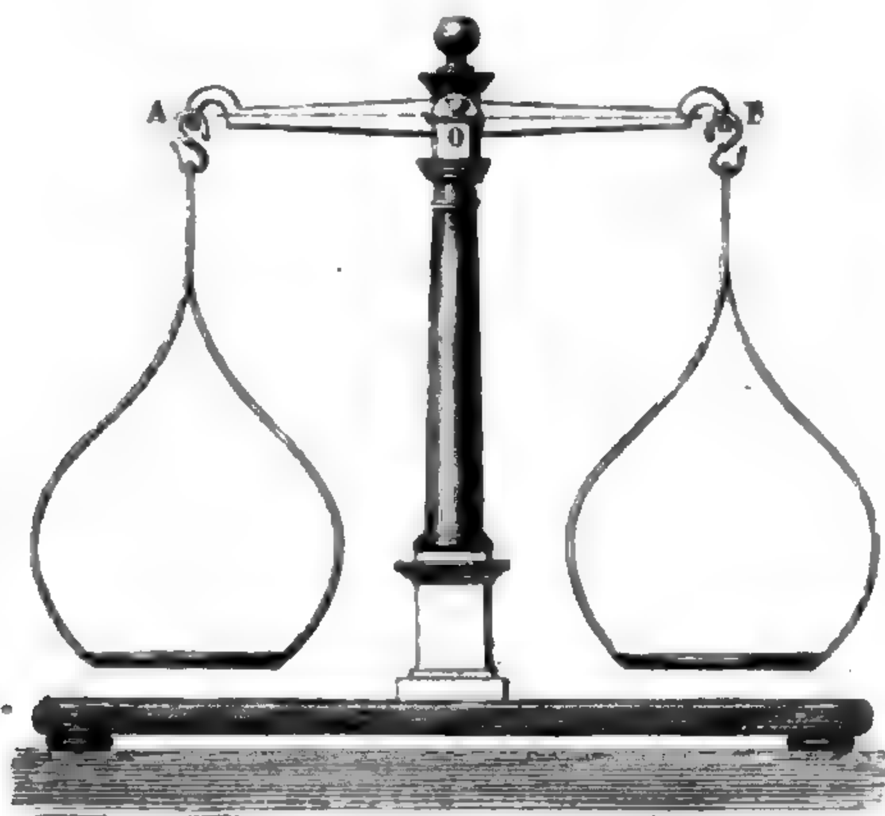


Fig. 40. — Balance.

se place dans une position d'équilibre stable (28). Cette position est accusée ordinairement par une aiguille fixée perpendiculairement au fléau et dont l'extrémité se place dans ce cas en regard du zéro d'un cadran divisé.

Cet équilibre ne sera pas troublé si aux extrémités du fléau on suspend deux plateaux de même nature, de même forme et de

mêmes dimensions. Il ne le sera pas davantage si dans les plateaux on place des poids égaux. Réciproquement, si deux corps placés dans les deux plateaux se font équilibre, c'est que leurs poids sont égaux; c'est là le principe de l'emploi si connu de la balance.

55. Justesse de la balance. — Pour que cette conclusion soit exacte, il faut que le fléau, étant d'ailleurs bien symétrique par rapport au plan qui passe par l'axe de suspension, les plateaux soient suspendus rigoureusement à la même distance de l'axe, c'est-à-dire que les bras de levier soient exactement égaux. On reconnaît qu'il en est ainsi lorsque l'aiguille se maintient en regard du zéro, les plateaux étant vides ou chargés de deux poids égaux. Si l'on n'a pas deux poids exactement égaux, il suffit de placer un corps quelconque dans l'un des plateaux et de lui faire équilibre dans l'autre; en changeant les corps de plateau, cet équilibre devra se maintenir. S'il n'en était pas ainsi, c'est que les bras de levier ne seraient pas égaux.

Autant l'égalité des bras de levier est facile à obtenir approximativement, autant elle est difficile à réaliser d'une manière rigoureuse; aussi toutes les fois qu'on a besoin d'une grande rigueur, on se sert de la méthode de la double pesée, qui permet d'obtenir exactement le poids, même quand les bras de levier sont un peu inégaux. Cette méthode consiste à tarer d'abord le corps à peser avec des substances quelconques, de la grenaille de plomb par exemple, puis à le remplacer par les poids marqués nécessaires pour obtenir l'équilibre. Il est clair que ces derniers, remplaçant le corps dans les mêmes circonstances, ont un poids exactement égal au sien.

56. Sensibilité de la balance. — On dit qu'une balance est plus ou moins sensible lorsque le fléau, supposé horizontal, s'incline plus ou moins sous l'influence d'un excédant de poids déterminé placé dans l'un des plateaux. La sensibilité dépend d'abord du frottement de l'axe contre les appuis. Dans les balances de construction soignée, cet axe est formé par l'arête d'un prisme triangulaire en acier très-dur qui repose sur un plan également d'acier ou d'agate. De cette façon, la rotation s'exécutant autour d'un axe très-délié, les matières étant d'ailleurs très-dures, le frottement est extrêmement faible.

Au point de vue mécanique, la sensibilité dépend du poids du fléau, de sa longueur et de la distance qui sépare l'axe de suspension du centre de gravité. Nous allons apprécier l'influence de ces divers éléments.

Soit AB l'axe du fléau, O le point de suspension et G le centre de gravité. Si, les plateaux étant chargés de poids égaux, on vient à mettre dans l'un d'eux un excédant de poids p, le fléau s'inclinera et prendra une position telle que A'B', en tournant d'un angle que nous appelerons α et qu'il est facile de calculer.

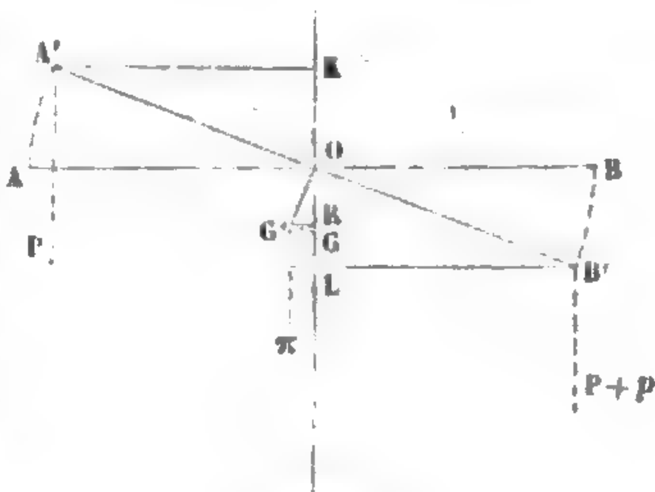


Fig. 41.

En effet, en A' et B' agissent les forces P et P + p, P désignant la partie commune de la charge qui comprend le poids des plateaux. Or les deux forces P se détruisent mutuellement par la résistance de l'axe O; il ne reste plus que la force p appliquée en B' et le poids π du fléau appliqué en G', nouvelle position du centre de gravité. Ces deux forces sont parallèles, elles se font équilibre par l'intermédiaire de l'axe O, c'est-à-dire que leur résultante passe au point O. Les distances de ce point aux points d'application des forces doivent donc être inversement proportionnelles à ces forces elles-mêmes, ce qui donne la relation

$$\pi . G'R = p . B'L.$$

Mais en appelant l la demi-longueur du fléau et r la distance OG, on a

$$G'R = r \sin\alpha, \quad B'L = l \cos\alpha;$$

d'où $\pi r \sin\alpha = pl \cos\alpha$ et par suite

$$\tang \alpha = \frac{pl}{\pi r}. \qquad (a)$$

La formule (a) contient toute la théorie de la sensibilité de la balance. On voit d'abord que tang α augmente avec l'excédant de

poids *p*, ce qui est évident *à priori*. On voit aussi que la sensibilité sera d'autant plus grande que *l* sera plus grand et π plus petit, c'est-à-dire que le fléau sera à la fois plus long et plus léger; mais il est évident d'ailleurs que, sous l'action des poids employés, le fléau doit être invariable et n'éprouver aucune déformation. Construire un fléau qui, capable de supporter sans fléchir l'action de forces données, soit le plus long et le plus léger possible, tel est donc le problème de la construction de la balance.

Fortin, qui a construit des balances justement estimées, employait pour ses fléaux des règles d'acier placées de champ; il obtenait ainsi une grande rigidité, mais certainement pas toute la légèreté possible. Aujourd'hui les constructeurs emploient de préférence, comme le montre la figure 42, des fléaux de cuivre ou d'acier évidés. Ils leur donnent assez ordinairement la forme d'un losange très-allongé, dont les côtés sont réunis par des tiges diversement disposées. C'est un problème spécial et, sur une petite échelle, l'application de ce principe de mécanique appliquée qui nous apprend que les organes creux, à égalité de poids, résistent plus que les organes pleins, et par conséquent, à égalité de résistance, sont plus légers. L'aluminium, qui réunit à une rigidité comparable à celle du cuivre une densité près de quatre fois plus faible, se trouve naturellement indiqué pour la construction des fléaux. Toutefois son emploi s'est peu étendu, soit que son prix, toujours fort élevé, ait été un obstacle, soit qu'on ait reconnu que ce métal n'a pas un degré d'inaltérabilité aussi grand qu'on l'avait supposé à l'origine.

La formule (*a*) nous montre en second lieu que la sensibilité est d'autant plus grande que *r* est plus petit, c'est-à-dire que le centre de gravité est plus près du centre de suspension. Il ne faut pas pourtant que ces deux points coïncident, car dans ce cas, quel que fût l'excédant de poids, le fléau s'inclinerait aussi complétement que le permettrait le mécanisme; il n'y aurait aucun moyen d'appréciation sous ce rapport, la balance serait *indifférente*. Dire que la distance entre le centre de gravité et le point de suspension ne doit pas être nulle, c'est dire qu'elle ne doit pas être trop petite, car physiquement c'est la même chose. En réalité, cette distance est déterminée par la valeur en poids qui correspond

aux divisions de l'arc gradué en regard duquel se meut l'aiguille. Si, par exemple, il y a 20 divisions de part et d'autre du zéro, et qu'il faille 2 milligrammes pour le déplacement total de l'aiguille, chaque division correspondra à un excédant de poids de $\frac{2}{20}$ ou $\frac{1}{10}$ de milligramme. Pour qu'il en soit ainsi, il faut évidemment une valeur de r convenable ; le constructeur arrive à la régler avec précision en se servant de l'écrou que l'on voit dans la figure au-dessus du fléau et qui permet de faire varier un peu la position du centre de gravité.

Dans l'analyse qui vient d'être faite, nous avons supposé que les trois points de suspension du fléau et des plateaux sont en ligne droite; dans ce cas, la valeur de tang α ne renferme pas P, c'est-à-dire que la sensibilité est indépendante de la charge. Cela tient à ce que la résultante des deux forces P passe par le point O et y est détruite par la fixité de l'axe. Il n'en serait pas de même si, par exemple, les points de suspension des plateaux étaient au-dessus de celui du fléau; dans ce cas, le point d'application de la charge commune est au-dessus du point O, et quand le fléau s'incline, elle agit dans le même sens que l'excédant de poids; la sensibilité augmente donc avec la charge. Elle diminue, au contraire, lorsque les points de suspension des plateaux sont au-dessous de celui du fléau. Cette variation de la sensibilité avec la charge constitue un inconvénient grave, car, ainsi que nous l'avons dit tout à l'heure, on se sert pour évaluer les poids des déplacements de l'aiguille, et il faut pour cela que les mêmes déplacements correspondent au même excédant de poids. Si on voulait employer l'une des deux dispositions précédentes, il faudrait peser sous charge constante. Cette méthode, qui constitue une sorte de double pesée, consiste à placer à demeure dans l'un des plateaux un poids égal à la charge maxima. Dans l'autre plateau se trouve la même charge en poids marqués subdivisés. Quand on place le corps dans ce dernier plateau, on est obligé, pour maintenir l'équilibre, d'enlever un certain nombre de poids qui représentent évidemment le poids du corps.

Dans la seconde des dispositions indiquées, la charge maxima correspond au minimum de sensibilité; il est clair par conséquent

qu'elle ne saurait être employée, puisqu'on devrait toujours opérer dans la condition la plus défavorable. Il n'y a donc d'acceptable que la disposition des points de suspension des plateaux situés au-dessus de celui du fléau, mais sous la condition de peser avec charge constante.

Remarquons, au surplus, que, rigoureusement parlant, la sensibilité dépend toujours de la charge qui produit nécessairement une variation du frottement sur l'axe de suspension. D'ailleurs, il résulte de la constitution même des corps qu'il n'y a aucun système qui ne cède même aux plus faibles actions. Il est donc rationnel d'opérer sous charge constante, afin de se trouver toujours, à ce point de vue, dans les mêmes conditions.

57. Suspension des plateaux. — Une condition fondamentale de l'exactitude de la balance, c'est que le poids des plateaux et la

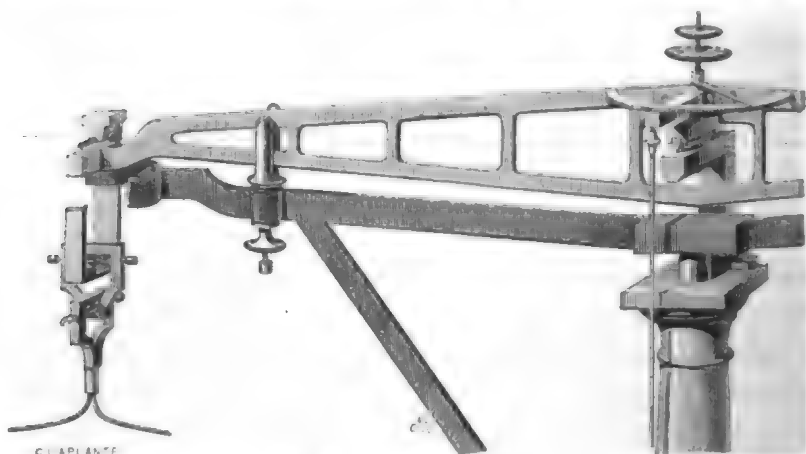


Fig. 42. — Fléau de balance.

charge qu'ils contiennent agissent bien toujours au même point et à la même distance de l'axe de suspension. Ce résultat important s'obtient de diverses manières. La disposition que représente le modèle dessiné (fig. 42) est une des plus rationnelles. Le fléau présente à ses extrémités deux couteaux parallèles à l'axe de rotation et dont les arêtes sont dirigées supérieurement. Sur ces couteaux pose, par une surface plane et dure d'agate ou d'acier, un étrier dont dans la figure on a enlevé la partie antérieure. Sur la partie

inférieure de l'étrier repose un autre couteau faisant partie d'un système auquel s'articule librement la partie supérieure du bassin. De cette façon, quelle que soit la position des poids, leur action se réduit toujours à une force verticale agissant à la partie supérieure de l'arête du fléau.

La figure 43 représente une balance de précision avec la cage de verre qui la renferme. On voit en bas l'extrémité d'un levier, qui

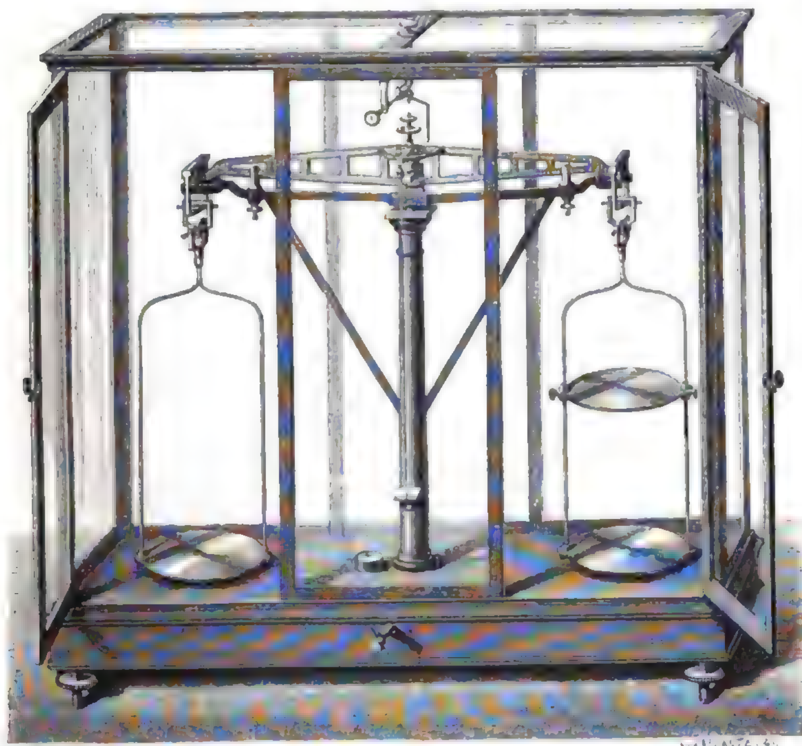


Fig. 43. — Balance de précision.

permet de soulever le fléau et d'empêcher le couteau de se fatiguer quand on ne se sert pas de l'appareil. On peut remarquer en haut un petit mécanisme usité par quelques constructeurs, mais qui n'est pas d'un emploi général. En avant du fléau est un cercle divisé horizontal, sur lequel on peut faire mouvoir un petit index métallique; ses divers déplacements peuvent produire définitivement l'équilibre et correspondent d'ailleurs à des diffé-

rences de poids dont on peut se rendre compte à l'avance une fois pour toutes.

58. Densités. — Si l'on pèse les différents corps de la nature sous le même volume, on trouve qu'ils ont des poids différents. C'est ainsi que tandis que 1 litre d'eau pèse 1 kilogramme, 1 litre de mercure pèse $13^k,6$, 1 litre d'alcool $0^k,79$, etc. C'est ce qu'on exprime en disant que les différents corps ont des densités différentes. Il est évident qu'il y a un intérêt très-réel à connaître le poids *spécifique* de chacune des substances naturelles; c'est là en effet un élément fondamental de leur constitution physique. On conçoit donc que l'on ait cherché à dresser une liste de tous les corps connus et renfermant, par exemple, le poids du litre de chacun de ces corps. La manière de dresser cette liste se conçoit aisément, il suffirait de peser un certain volume connu de chaque corps, et de diviser le poids obtenu par le volume; on aurait ainsi le poids de l'unité de volume.

On peut s'y prendre d'une tout autre façon. On sait, d'après les conventions de notre système de poids et mesures, que :

Un centimètre cube d'eau pèse un gramme;

Un décimètre cube ou un litre pèse un kilogramme;

Un mètre cube pèse mille kilogrammes, ou une tonne.

Si d'après cela on cherche le rapport du poids d'un certain volume d'un corps au poids du même volume d'eau, ce rapport exprimera en grammes, kilogrammes ou tonnes, le poids de 1 centimètre cube, de 1 décimètre cube ou de 1 mètre cube de la substance considérée. Si, par exemple, c'est du platine et qu'on trouve que le rapport du poids du platine au poids d'un égal volume d'eau est 21, cela veut dire que 1 centimètre cube de platine pèse 21 grammes, ou que 1 décimètre cube pèse 21 kilogrammes, ou que 1 mètre cube pèse 21 tonnes.

On voit donc que le même nombre exprime soit le rapport du poids du corps au poids du même volume d'eau, soit le poids de l'unité de volume. On donne indifféremment à ce nombre, en physique, le nom de *densité* ou *poids spécifique*.

La connaissance des densités est fort utile au point de vue pratique, elle permet de déterminer le volume quand on connaît le

poids, ou réciproquement. Soit en effet P le poids d'un corps, et V son volume, le poids de l'unité de volume est $\frac{P}{V}$. On a donc, en désignant ce poids, qui n'est autre chose que la densité, par D, $\frac{P}{V} = D$ ou $P = VD$.

Dans cette formule, les unités qui servent à évaluer le poids et le volume sont quelconques, mais P et D sont nécessairement exprimés à l'aide de la même unité. Si, conformément à notre système de poids et mesures, on prend pour unité de poids le poids de l'unité de volume de l'eau, D représentera le rapport du poids de l'unité de volume du corps au poids de l'unité de volume de l'eau, ou plus généralement le rapport du poids d'un certain volume du corps au poids du même volume d'eau. On voit donc que dans les résultats de la formule le poids obtenu sera toujours exprimé en unités représentant le poids de l'eau contenue dans l'unité de volume adoptée.

Exemple I. — Quel est le poids d'une masse de granite de 84 mètres cubes, la densité du granite étant 2,75? La formule donne

$$P = 84 \times 2,75 = 231 \text{ tonnes.}$$

Exemple II. — Quel est le volume de 1000 kilogrammes de mercure, la densité du mercure étant 13,6?

$$V = \frac{1000}{13,6} = 73^{\text{lit}},5.$$

59. Détermination de la densité. — Pour déterminer la densité d'un solide on commence par le peser, soit par exemple son poids égal à 10 grammes. On le place ensuite sur l'un des plateaux d'une balance, à côté d'un flacon à large goulot (fig. 44) d'une forme semblable à celle qu'indique la figure et exactement plein d'eau ; on fait équilibre dans l'autre plateau avec des matières quelconques. Cela fait, on introduit le corps dans le flacon, il sort évidemment un volume d'eau égal au volume même du corps. Si donc on ferme le flacon en s'assurant bien qu'il est rempli de la même façon que tout à l'heure, qu'on l'essuie et qu'on le remette sur la balance, il n'y aura

plus équilibre. Pour le rétablir il faudra ajouter par exemple $2^{gr},5$, c'est le poids d'un volume d'eau égal à celui du corps; la densité de celui-ci est donc $\frac{10}{2,5} = 4$.

Quand on veut déterminer la densité d'un liquide, on se sert d'un

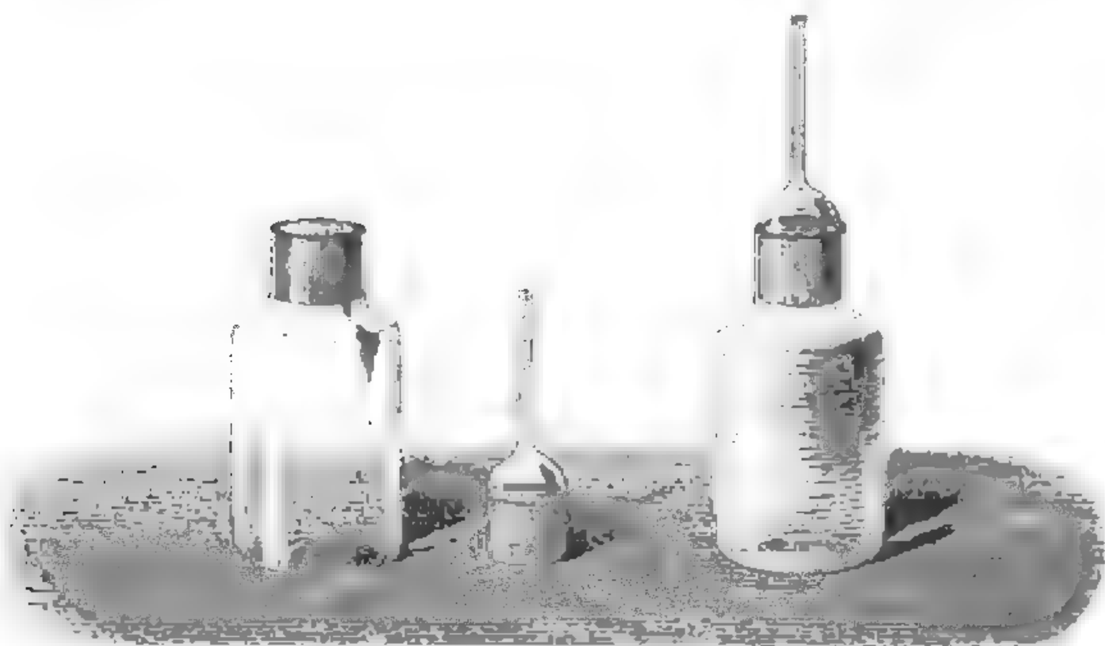


Fig. 44. — Flacon à densité pour les solides.



Fig. 45. — Flacon à densité pour les liquides.

flacon (fig. 45) terminé supérieurement par un tube étroit sur lequel est tracé un point de repère. Après avoir pris la tare du flacon vide, on le remplit successivement du liquide et d'eau jusqu'au point de repère, on détermine ainsi les poids du même volume d'eau et du liquide dont on veut déterminer la densité, le quotient du premier poids par le second donne la densité cherchée.

Le remplissage du flacon présente quelque difficulté à cause du très-petit diamètre du tube. On met ordinairement un peu de liquide dans l'entonnoir qui termine le tube à la partie supérieure, et on presse avec le bouchon; cette pression est généralement suffisante pour faire pénétrer le liquide dans le flacon. Ces deux méthodes de détermination des densités sont susceptibles de beaucoup de précision.

Nous donnons dans le tableau suivant les densités de quelques corps solides et liquides.

SOLIDES.

Glace (eau solide)	0,92
Diamant	3,55
Graphite	2,50
Phosphore blanc	1,83
Phosphore rouge	1,96
Soufre octaédrique	2,67
Soufre cristallisé par fusion	1,96
Soufre mou	1,92
Sélénium	4,28
Or	20,688
Argent	10,56
Platine	21 à 22
Arsenic	5,67
Antimoine	6,72
Potassium	0,86
Sodium	0,972
Manganèse	de 7 à 8
Cuivre	8,8
Étain	7,291
Chrome	5,90
Plomb	11,445
Bismuth	9,82
Silice cristallisée (Quartz)	2,653
Chaux	3,15
Acier	7,83
Fonte	7,05
Bronze des canons	9,235
Laiton	8,427
Verre à vitre	2,527
Cristal	3,330
Porcelaine	2,242
Albâtre	2,758
Marbres	2,65 à 2,75
Brique dure	1,56
Jais	1,305
Asphalte	1,063
Charbons de Chêne	1,53
Charbons de Peuplier	1,45
Charbons de Saule	1,55
Charbons de Tilleul	1,46
Charbons de Aune	1,48
Chêne	0,610
Peuplier	0,387
Saule	0,487
Tilleul	0,604

LIQUIDES.

Eau de mer	1,026
Brome	2,96
Mercure	13,596
Acide sulfurique à 66°	1,84
Acide azotique concentré	1,52
Acide chlorhydrique concentré	1,21
Acide acétique cristallisable	1,17
Huile d'olive	0,919
Alcool absolu	0,80
Éther	0,73
Esprit de bois	0,82
Benzine	0,85
Huile de naphte	0,84
Essence de térébenthine	0,87
Essence de citron	0,85
Essence d'amandes amères	1,043
Nicotine	1,024
Vin de Bordeaux	0,996
Vin de Bourgogne	0,925
Vin du Rhin	0,99
Vin de Malaga	1,070
Sang (homme)	1,055
Lait de vache	1,03
Urine (homme)	1,02

CHAPITRE VIII.

HYDROSTATIQUE.

60. Transmission des pressions. — La constitution spéciale des liquides (19) donne lieu à des remarques importantes au sujet de la nature et de la transmission des pressions dans cette classe de corps. Si l'on imagine que dans un vase A (fig. 46) plein de liquide on pratique une ouverture en P, et qu'à l'aide d'un piston on exerce sur le liquide une certaine pression, l'effet de cette pression sera de rapprocher les molécules et de faire naître par suite une réaction répulsive entre elles. Cet effet se produisant dans toute l'étendue de la masse, on conçoit que chacun des points des parois sera pressé de telle sorte que l'effet de la pression unique se transmettra dans une infinité de directions diverses. Cette sorte d'irradiation des pressions dans les fluides en général constitue un caractère tout à fait distinctif et d'une application continuelle.

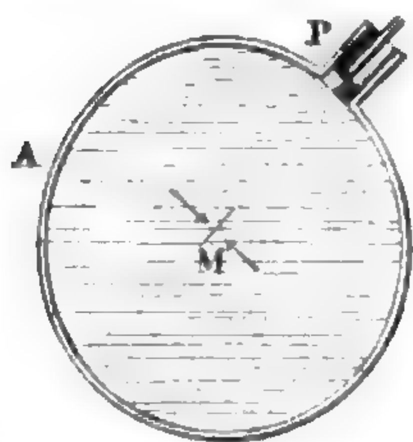


Fig. 46. — Transmission des pressions.

Ce n'est pas seulement sur les parois que se manifeste l'effet de la pression exercée en P, c'est aussi dans tous les points de la masse liquide. Ainsi une petite lame plane, que l'on peut supposer en M, éprouvera deux pressions égales et contraires sur ses deux faces opposées. Il est en outre très-important de remarquer qu'à raison de l'homogénéité du liquide, ces pressions ne changeront pas de valeur, si l'on imagine que la lame tourne sur elle-même en prenant diverses directions dans la masse liquide, car il n'y a évidem-

ment aucune raison pour que la pression soit plus grande dans un sens que dans l'autre.

61. Direction des pressions. — La même raison de symétrie nous indique qu'en chacun des points où elles s'exercent, ces pressions sont normales ou perpendiculaires à la surface; car s'il y avait une raison pour qu'elles fussent inclinées dans un certain sens, il y en aurait une pareille pour qu'elles le fussent dans tout autre. On se rend compte aussi de ce fait fort important en remarquant que si en un point M d'une paroi quelconque (fig. 47), la pression PM n'était pas normale, on pourrait la décomposer en deux, l'une, MN, dirigée suivant la normale à la paroi, et qui serait détruite par la résistance de la paroi elle-même; l'autre, MA, dirigée suivant la paroi elle-même : celle-ci aurait pour effet de faire glisser la molécule liquide située en M, laquelle sert d'organe de transmission à la pression.

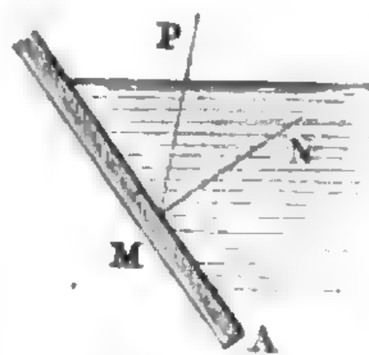
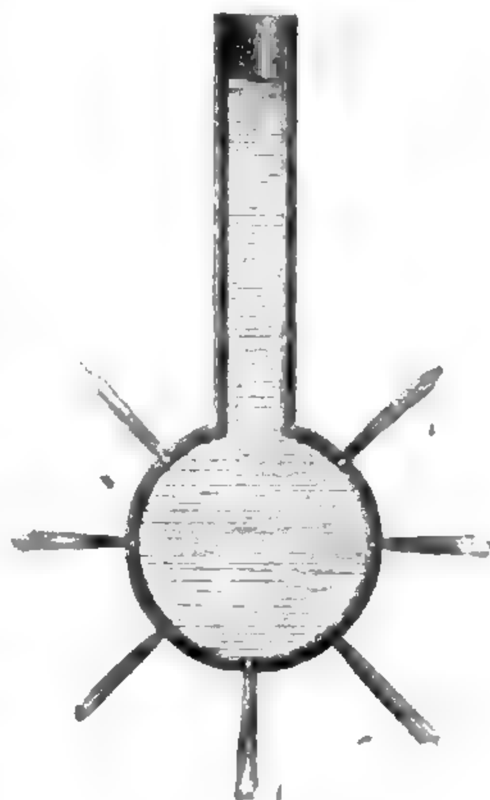


Fig. 47.

On peut sinon démontrer rigoureusement par la voie expérimentale, du moins rendre sensible la direction normale des pressions transmises à l'aide de l'expérience suivante. On se sert d'une sphère percée de diverses ouvertures et renfermant un liquide que l'on comprime à l'aide d'un piston que contient un tube en communication avec la sphère. On voit le liquide jaillir en filets qui affectent une forme curviligne produite par l'action de la pesanteur, mais qui à leur origine paraissent perpendiculaires à la surface sphérique; l'effet est d'ailleurs d'autant plus appréciable que la pression exercée est plus grande.


Fig. 48.

62. Principe de Pascal ou de la transmission égale des pressions en tous sens. — Si l'on a un vase A plein de liquide (fig. 49), et qu'en un certain point P on exerce à l'aide d'un piston d'un centimètre carré de surface, par exemple, une certaine pression, chaque

centimètre carré des parois supportera une pression égale. Si donc en un point quelconque on pratique une ouverture d'un centimètre carré de surface, et qu'on la ferme avec un piston, il faudra, pour empêcher celui-ci de se mouvoir, lui appliquer de dehors en dedans une pression égale à celle qui est appliquée directement au piston P. Une lame de même surface et placée comme on voudra dans le liquide éprouvera sur ses deux faces une pression égale.

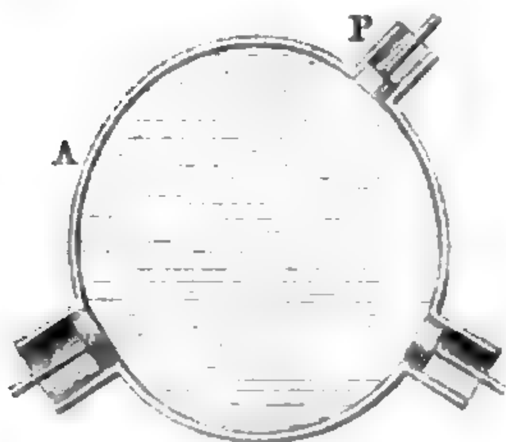


Fig. 49. — Principe de Pascal.

De là résulte que si l'on imagine un piston d'une surface égale à deux centimètres carrés fermant une ouverture correspondante, chacun de ces centimètres superficiels recevant une pression égale à celle qui agit sur P, leur ensemble subira une pression double, d'où l'on voit qu'en général la pression transmise devra varier proportionnellement à l'étendue de la surface qui la reçoit.

C'est sous cette forme que Pascal a énoncé le principe dans son traité célèbre de l'*Équilibre des liqueurs*. « Si un vaisseau plein d'eau, clos de toutes parts, a deux ouvertures, l'une centuple de l'autre : en mettant à chacune un piston qui lui soit juste, un homme poussant le petit piston égalera la force de cent hommes qui pousseront celui qui est cent fois plus large et en surmontera 99.

« Et quelque proportion qu'aient ces ouvertures, si les forces qu'on mettra sur les pistons sont comme les ouvertures, elles seront en équilibre[1]. »

Soit en général P la pression exercée sur un liquide à l'aide d'un piston d'une étendue superficielle S; l'unité de surface de ce piston sera soumise à une pression $\frac{P}{S}$ et par suite sur chacune des unités de surface des parois se produira une pression pareille. Si donc on pratique en différents points des ouvertures de sections S', S''... et qu'on les ferme avec des pistons, il faudra, pour empêcher

1. Pascal, *Traité de l'équilibre des liqueurs*, chap. II.

ceux-ci de se mouvoir, leur appliquer des forces P′, P″... égales respectivement à $S'.\frac{P}{S}$, $S''.\frac{P}{S}$,... ce qui donne les égalités suivantes :

$$P'=S'.\frac{P}{S},\ P''=S''.\frac{P}{S}\ldots \text{ ou } \frac{P}{S}=\frac{P'}{S'}=\frac{P''}{S''}\cdots$$

63. Le principe de Pascal conduit à une conséquence qu'on pourrait chercher à vérifier expérimentalement. Soit un système de deux tubes communiquant l'un avec l'autre et de sections inégales; supposons que l'on y introduise un liquide, celui-ci s'élèvera à la même hauteur dans les deux branches, c'est un fait d'expérience que nous justifierons d'ailleurs plus loin. Si alors on place au-dessus du liquide dans le tube étroit un piston, et qu'on le soumette à une certaine pression P, celle-ci se transmettra au liquide qui sera refoulé dans le grand tube; pour empêcher ce mouvement, il faudra placer un piston et le presser avec une force qui ait avec la force P le même rapport que celui qui existe entre la surface du grand piston et celle du petit. Si, par exemple, le premier a une section seize fois plus grande, une pression de 1 kilogramme exercée à l'une des extrémités de la colonne liquide produira une pression de 16 kilogrammes à l'autre extrémité. On voit donc qu'avec une petite force on pourra en produire une très-considérable; c'est là le principe de la presse hydraulique, appareil qui sera décrit plus loin.

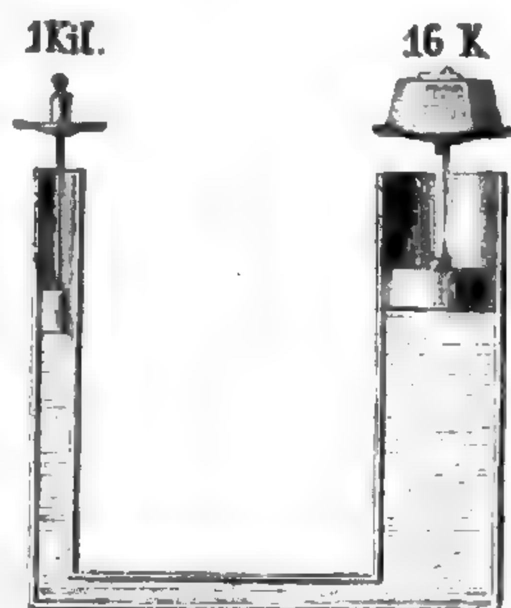


Fig. 50. — Principe de la presse hydraulique.

On remarquera toutefois que s'il s'agit de produire une pression effective, les deux pistons devront se déplacer, et il est bien évident que par suite de la différence des sections, si le petit piston parcourt un certain espace, le grand piston parcourra un espace seize fois plus petit, de sorte qu'on vérifie directement dans cet appareil ce principe général de mécanique, que *ce que l'on gagne en force on le perd en vitesse.*

Cette double observation a été clairement énoncée par Pascal,

qui s'exprime ainsi à la suite du passage que nous avons déjà cité : « D'où il paraît qu'un vaisseau plein d'eau est un nouveau principe de mécanique et une machine nouvelle pour multiplier les forces à tel degré qu'on voudra, puisqu'un homme par ce moyen pourra enlever tel fardeau qu'on lui proposera.

« Et l'on doit admirer qu'il se rencontre en cette machine nouvelle cet ordre constant qui se trouve en toutes les anciennes, savoir : le levier, le tour, la vis, etc., qui est que le chemin est augmenté en même proportion que la force ; car il est visible que comme une de ces ouvertures est centuple de l'autre, si l'homme qui pousse le petit piston l'enfonçait d'un pouce, il ne repousserait l'autre que de la centième partie seulement. »

Si l'on essayait d'exécuter l'expérience précédente pour démontrer expérimentalement le principe de Pascal, on n'arriverait qu'à une vérification grossière; ce qui tient à ce que les pistons devant s'ajuster exactement dans les ouvertures pour que l'expérience soit précise, il en résulte un frottement très-considérable. On aurait une vérification moins satisfaisante encore si l'on essayait de réaliser l'expérience décrite (62), car ici, outre la cause d'erreur qui vient d'être indiquée, il y a à tenir compte de l'action de la pesanteur qui produit par elle-même des pressions variables aux diverses ouvertures suivant leur profondeur dans la masse liquide. En réalité, le principe de Pascal est un principe abstrait, sorte de synthèse générale des phénomènes et qui ne saurait être l'objet d'une démonstration particulière. C'est par l'accord constant des conséquences qui en découlent avec l'observation, que l'autorité et la légitimité du principe peuvent être établies; on verra par tout ce qui va suivre que cet accord est complet et ne souffre aucune exception.

64. Principe fondamental d'équilibre dans les liquides pesants. — Couches de niveau. — Le principe de Pascal est une conséquence générale de la constitution des liquides, il est indépendant de l'action de la pesanteur. Quand on fait intervenir cette dernière force, on arrive à des résultats particuliers que nous allons faire connaître successivement. Le plus important, qui peut être considéré comme la règle fondamentale de l'hydrostatique, consiste en ce que *les différents points d'une couche horizontale dans un liquide*

pesant sont soumis à une même pression. Considérons en effet dans une masse liquide (fig. 51) deux points A et B situés sur un même plan horizontal. Imaginons que les deux points A et B soient les centres de deux petites surfaces planes, verticales et parallèles, nous pouvons considérer ces surfaces comme les bases d'un cylindre horizontal très-délié de liquide. Ce cylindre étant particulièrement en équilibre dans la masse générale, on doit en conclure que ses bases A et B subissent dans le sens des flèches que montre la figure des pressions égales et contraires, car les autres pressions provenant du liquide ambiant et qui sont perpendiculaires aux génératrices ne sauraient en rien influer sur l'équilibre dans le sens horizontal. Les deux éléments A et B subissent donc dans un sens déterminé une même pression; mais cette pression est d'ailleurs la même dans tous les sens (60). Les points A et B sont des points quelconques de la surface, celle-ci supporte donc des pressions égales en chacun de ses points. On peut ajouter comme conséquence que la densité est aussi constante dans tous les points de la couche horizontale. A raison du peu de compressibilité des liquides, la variation de densité est très-peu sensible; mais le résultat précédent est vrai pour un fluide pesant, quel que soit le degré de compression qu'il puisse subir.

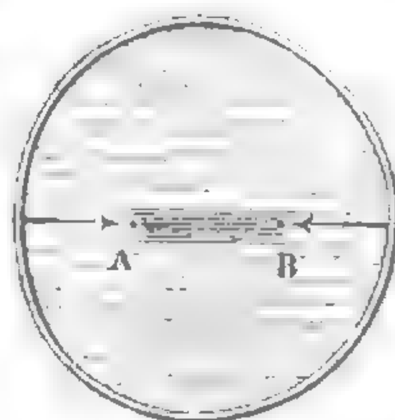


Fig. 51.

On nomme en général *couches de niveau* dans un liquide les couches d'égale pression; on doit donc conclure de ce qui précède que, par suite de l'action de la pesanteur sur une masse liquide, les couches de niveau sont des surfaces horizontales.

D'une couche de niveau à l'autre la pression augmente ou diminue suivant que la profondeur augmente ou diminue elle-même. Ainsi, par exemple, si nous considérons dans le plan de niveau AB (fig. 52) un petit élément horizontal *m*, et que nous concevions le cylindre vertical *mm'* s'élevant jusqu'à la couche de niveau CD, il est bien

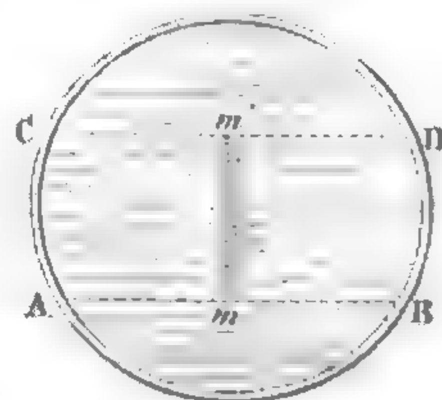


Fig. 52.

clair qu'indépendamment de la pression que supporte *m'* et qui se transmet intégralement jusqu'en *m*, ce dernier élément supporte en plus une pression égale au poids du liquide contenu dans le cylindre *mm'*.

Si l'on appelle *s* l'aire de l'élément *m*, *h* la distance des deux couches de niveau et *d* la densité du liquide, le volume du cylindre a pour mesure *sh* et son poids est *shd*. Cette dernière expression représente donc la variation de pression pour un élément d'étendue *s*, quand la profondeur varie d'une quantité égale à *h*.

65. Surface libre. — De ce qui précède résulte que la surface libre d'un liquide pesant doit être horizontale. Nous avons déjà donné de ce fait important une démonstration expérimentale. On peut aussi le prévoir *à priori*. Soit en effet CD (fig. 53) la surface libre, et *m*, *m'* deux petits éléments de surface égaux, pris dans la couche horizontale AB. Ces deux éléments doivent supporter une même pression, laquelle est évidemment représentée d'ailleurs par le poids des deux cylindres liquides *mn*, *m'n'*; ceux-ci doivent donc avoir même hauteur, ce qui veut dire que les points *n* et *n'* sont sur un même plan horizontal.

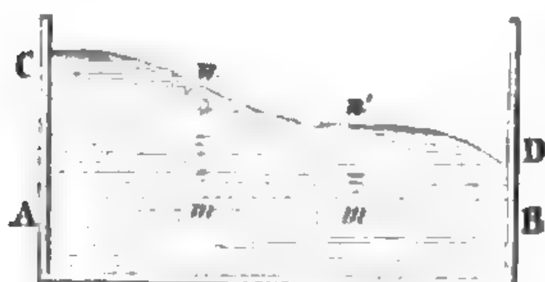


Fig. 53.

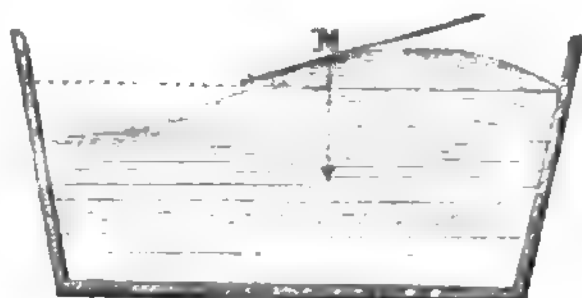


Fig. 54.

On arrive à la même conclusion en remarquant que si en un point quelconque de la surface M (fig. 54) il n'y avait pas horizontalité, on pourrait décomposer le poids de la molécule liquide située en M en deux forces, l'une perpendiculaire à la surface du liquide, l'autre suivant la surface même. La première n'aurait d'autre effet que de comprimer le liquide et serait détruite par la réaction de celui-ci; mais la seconde produirait le déplacement même de la molécule. L'équilibre ne saurait donc exister qu'à la condition de l'annulation de la seconde composante, c'est-à-dire qu'en chaque point la surface doit être horizontale.

Ce mode de raisonnement nous montre qu'en général, lorsque la masse liquide est soumise à l'action d'un nombre quelconque de forces, il faut pour l'équilibre qu'en chaque point la surface libre soit perpendiculaire à la résultante des forces agissantes. Si, par exemple, on dispose sur le banc de la force centrifuge un vase contenant un liquide (fig. 55) et qu'on lui imprime un mouvement de rotation, on verra la surface se creuser et affecter une forme curviligne. En effet, chacune des molécules est soumise simultanément à l'action de la pesanteur et à la force centrifuge, et c'est la résultante de ces deux forces qui doit être en chaque point perpendiculaire à la surface libre. On démontre aisément que cette surface doit être un paraboloïde de révolution, de sorte que la section représentée par la figure est une parabole.

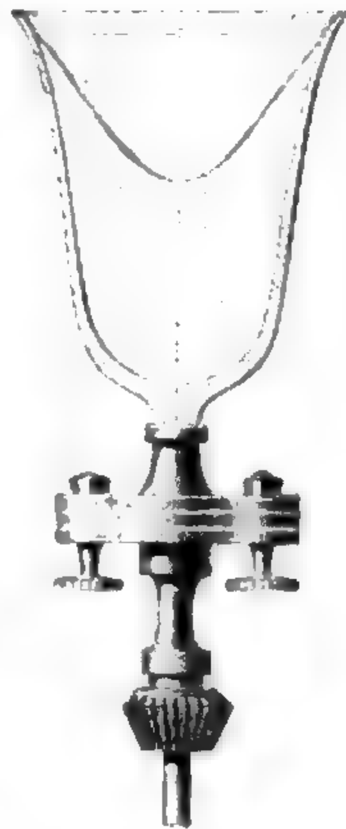


Fig. 55.

66. Pression sur le fond des vases. — Si l'on considère un liquide pesant placé dans un vase dont le fond soit formé par une surface *plane et horizontale,* il est aisé d'évaluer la pression que le liquide exerce sur ce fond. Soit ABMN (fig. 56) un vase renfermant du liquide jusqu'au niveau MN, et *m* un élément superficiel de surface sur le fond AB. Élevons sur *m* un petit cylindre vertical qui rencontre en *m'* la couche de niveau LL'. Au-dessus de l'élément *n* égal à *m* et pris sur la couche LL', concevons un cylindre vertical qui coupe en *n'* la couche de niveau RR'. Construisons de même le cylindre vertical qui, s'élevant au-dessus de l'élément *r* égal à *m*, vient rencontrer SS' en *r'*; il est évident qu'en poursuivant cette construction on arrivera toujours, quelle que soit la forme du vase, à un cylindre *ss'* qui aboutira à la surface libre MN. Cela posé, l'élément *m* supporte

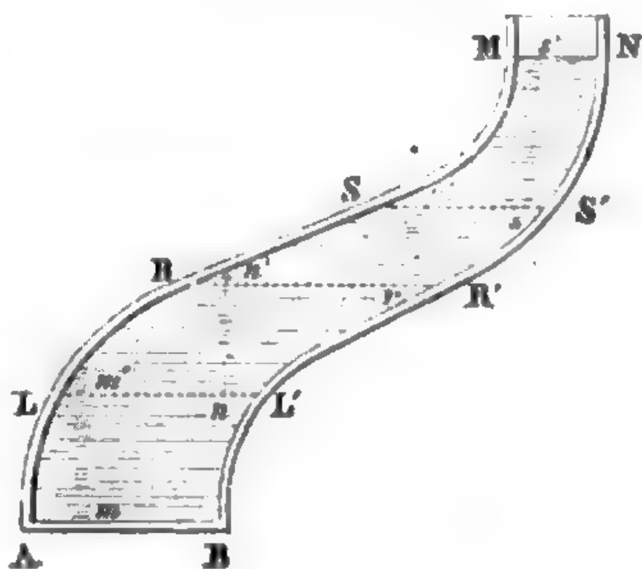


Fig. 56. — Pression sur le fond des vases.

une pression supérieure à celle que supporte *m'* d'une quantité égale au poids du cylindre *mm'*. De même, *m'* supporte une pression qui, égale à celle que subit *n*, surpasse celle qui se produit en *n'* d'une quantité égale au poids du cylindre *nn'*, d'où on voit évidemment, en poursuivant le raisonnement, que l'élément *m* supporte une pression égale à la somme des poids des cylindres *mm'*, *nn'*, *rr'*, *ss'*, c'est-à-dire au poids d'un cylindre liquide qui, ayant pour base *m*, s'élèverait verticalement jusqu'à la surface libre. Comme tous les points du fond horizontal AB sont également pressés, il s'ensuit que la pression totale [1] que supporte le fond du vase est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le fond lui-même, et pour hauteur la distance verticale qui le sépare de la surface libre, ou ce que l'on appelle la hauteur du liquide dans le vase.

Appelons B la surface du fond du vase, H la hauteur du liquide et D sa densité, la pression est exprimée par la formule BHD.

Si, par exemple, dans un vase dont le fond a 2 décimètres carrés de surface se trouve du mercure jusqu'à une hauteur de $0^{m},55$, le volume de la colonne de mercure qui mesure la pression est égal à $2 \times 5,5 = 11$ décimètres cubes, et son poids à $11 \times 13,59 = 149^{kilog.},49$.

67. Expérience des vases de Pascal. — La proposition précédente montre que la pression exercée sur le fond d'un vase ne dépend que de la surface du fond et de la hauteur du liquide, la forme du vase étant tout à fait sans influence. Pascal a imaginé, pour vérifier ce fait, une expérience qu'on répète dans tous les cours de physique, avec quelques modifications qui la rendent plus simple. On se sert d'un trépied (fig. 57) portant un anneau sur lequel on peut visser successivement trois vases de forme différente, l'un évasé par le haut, l'autre cylindrique, le troisième rétréci à la partie supérieure. A la partie inférieure de l'anneau se trouve un disque supporté par un fil fixé lui-même à l'un des plateaux d'une balance. Des poids placés dans l'autre plateau maintiennent le disque contre l'anneau avec une certaine force. Le vase cylindrique, par exemple, étant placé sur le trépied, on y verse de l'eau jusqu'à ce

1. On fait abstraction ici de la pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface libre et qui se transmet jusqu'au fond du vase.

que la pression exercée sur le disque le force à se détacher. Un indicateur marque le niveau du liquide lorsque ce phénomène se produit. Si on répète l'expérience avec les deux autres vases, on reconnaît que le disque se détache lorsque le niveau est arrivé à la même hauteur, ce qui montre bien que la pression exercée sur le fond du vase est indépendante de la forme de ce vase.

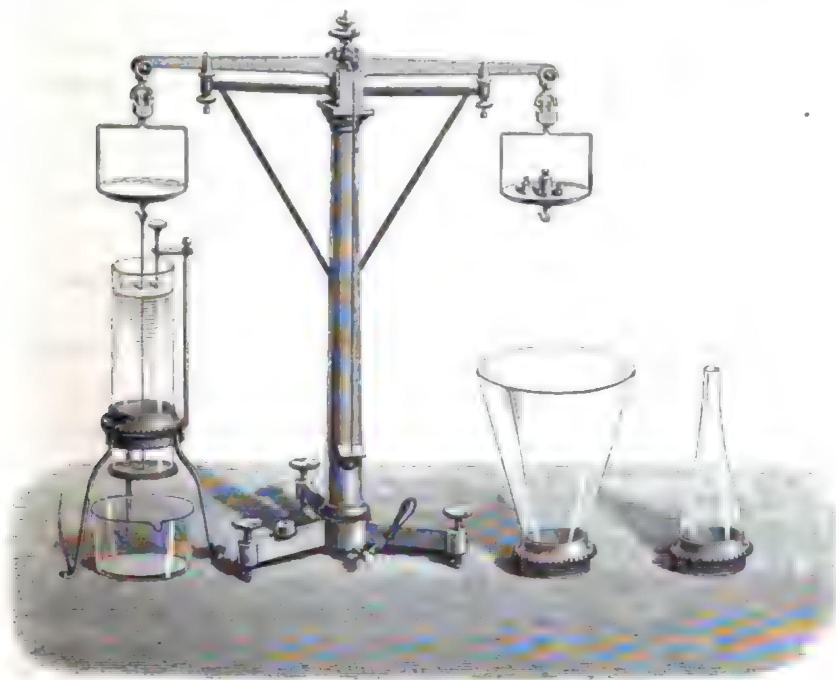


Fig. 57. — Expérience des vases de Pascal.

L'expérience permet d'aller plus loin, car, dans le cas du vase cylindrique, il est évident que la pression que supporte le fond est égale au poids du liquide qu'il contient. Or ce poids est précisément égal à celui qui a été placé dans le plateau de la balance, ce qui démontre que dans tous les cas la pression exercée sur le fond d'un vase est égale au poids d'une colonne liquide ayant pour base le fond, et pour hauteur la hauteur du liquide dans le vase.

68. Pression de bas en haut. — La pression qui s'exerce en un point d'une masse liquide étant la même dans tous les sens, une surface horizontale devra éprouver à sa partie inférieure une

pression de bas en haut, égale à celle qu'elle éprouverait de haut en bas si le liquide agissait dans l'autre sens. Prenons un tube ouvert aux deux bouts (fig. 58) et appliquons à sa partie inférieure un obturateur. En enfonçant le tube dans un liquide, la pression exercée par celui-ci appliquera l'obturateur contre le fond et l'y maintiendra avec une force d'autant plus grande qu'on l'enfoncera plus profondément. Versant alors du liquide dans le tube, l'obturateur sera pressé de haut en bas, et lorsque le niveau du liquide à l'intérieur sera le même qu'à l'extérieur, on le verra se détacher; c'est qu'alors la pression de bas en haut sera détruite par la pression équivalente que le liquide intérieur exerce en sens contraire.

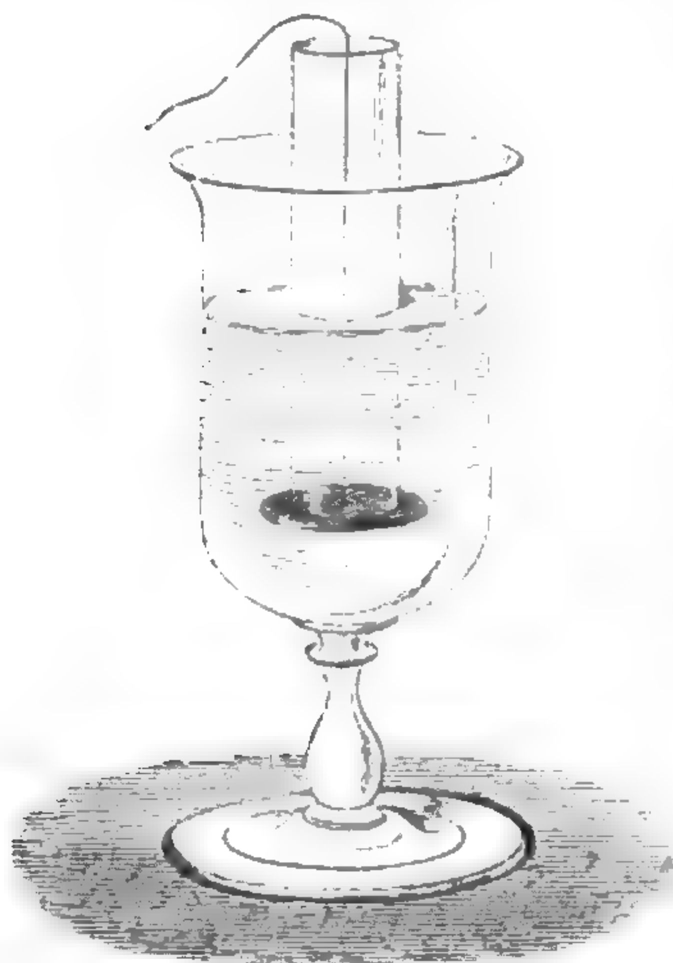


Fig. 58. — Pression de bas en haut.

69. Pression totale. — Paradoxe hydrostatique. — Considérons actuellement un vase de forme quelconque rempli de liquide; en chacun des points des parois se produisent des pressions normales d'autant plus intenses que les points sont plus éloignés de la surface libre, et égales d'ailleurs pour chacun d'eux à celle qui règne sur tous les points de la couche de niveau correspondante. On peut imaginer qu'on fasse la somme de toutes les pressions qui s'exercent ainsi sur les différents éléments superficiels de la paroi, c'est ce que l'on appelle la *pression totale* exercée par le liquide.

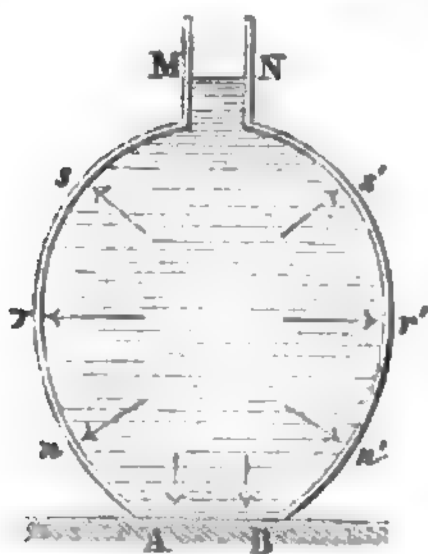


Fig. 59. — Pression totale.

Il est très-important de ne pas confondre cette pression totale avec celle qui se transmet au support sur lequel repose le vase. On voit en effet que, parmi les pressions élémentaires, les unes se transmettent *intégralement* au support, ce sont les pressions verticales qui agissent sur le fond horizontal AB; d'autres,

celles qui ont lieu en *n* et *n'*, ne se transmettent qu'en partie puisque leur direction est oblique; les pressions horizontales en *r* et *r'* sont évidemment sans influence, et quant aux pressions produites en *s* et *s'*, elles tendent à soulever le vase. C'est de la combinaison, de la *composition* de ces pressions diverses d'intensité et de direction, que résulte finalement la pression résultante transmise au support sur lequel le vase repose.

C'est cette confusion entre la pression exercée sur le fond d'un vase et celle qui se transmet au support qui le soutient, qui a donné naissance à ce qu'on a appelé le *paradoxe hydrostatique*. On trouvait contradictoire que des vases dont le fond horizontal est également pressé ne transmissent pas une pression égale au support sur lequel ce fond repose directement. Rien en réalité n'est moins paradoxal; la pression sur le fond du vase n'est que l'un des éléments qui doivent se combiner ensemble et produire la pression résultante et définitive qui se transmet au support.

70. Composition des pressions. — On peut regarder comme absolument évident que cette pression résultante est égale dans tous les cas au poids du liquide, ce qui revient à dire que si l'on place le vase et le liquide qu'il contient sur le plateau d'une balance, il faudra, pour leur faire équilibre, placer dans l'autre plateau un poids égal à la somme des poids du liquide et du vase. Ce résultat se démontre d'ailleurs aisément *à priori* dans un certain nombre de cas simples.

Ainsi, dans le cas d'un vase cylindrique ABCD (fig. 60), il est clair qu'il n'y a d'autre pression transmise que celle que supporte le fond et qui est égale au poids du liquide. Dans le cas du vase évasé, le support reçoit la pression exercée sur le fond AB, égale au poids de la colonne liquide ABKS, plus les poids des colonnes GHKC, RLDS, qui pressent sur GH et RL, ce qui fait en définitive le poids total du liquide contenu dans le vase. Enfin, dans le troisième cas, la

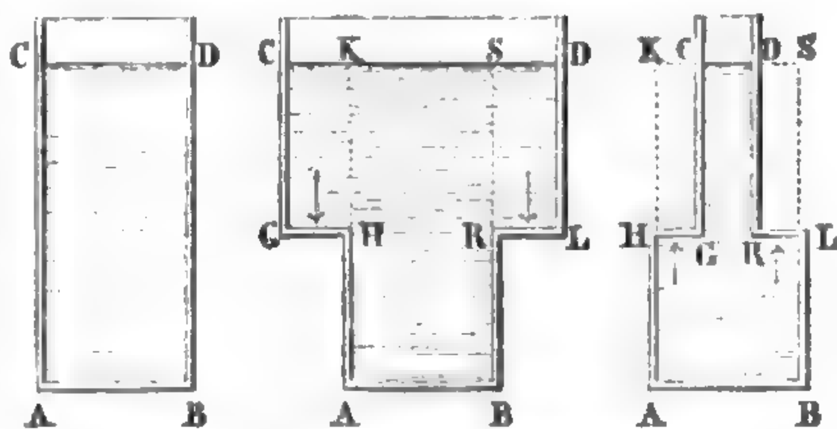


Fig. 60. — Paradoxe hydrostatique.

pression que supporte le fond AB, et qui est égale au poids de la colonne liquide ABSK, doit être diminuée des pressions contraires exercées sur HG et RL. Ces dernières étant représentées par les colonnes liquides HGKC, RLDS, il n'y a de transmis au support qu'une pression égale au poids du liquide que le vase contient.

En appliquant les règles ordinaires de la composition des forces, on peut démontrer facilement que ce résultat est tout à fait général. Or cette démonstration se fonde sur le principe de Pascal, elle conduit à une conséquence évidente par elle-même, on peut donc la considérer comme une justification rigoureuse de ce principe constitutif et fondamental de l'hydrostatique.

71. Mouvement produit par l'écoulement d'un liquide. — La démonstration dont il vient d'être question revient au fond à faire voir, par l'analyse des diverses pressions, que les composantes horizontales de ces pressions se font mutuellement équilibre, et que les composantes verticales se réduisent à une force unique égale au poids du liquide. L'évidence de la première partie de la proposition au point de vue expérimental n'est pas moins grande que celle de la seconde. Si l'on place en effet un vase E (fig. 61) de façon à le rendre très-mobile dans le sens horizontal, soit en le suspendant à un fil, soit en le plaçant sur un flotteur, et qu'on vienne à le remplir de liquide, on n'observe jamais, quelle que soit la mobilité de l'appareil, le moindre déplacement. Cela prouve que les composantes horizontales des pressions s'équilibrent mutuellement. Cet équilibre a lieu par l'intermédiaire du vase; mais si on suppose qu'en un point de celui-ci on pratique une ouverture, le liquide s'écoule et la pression exercée au point diamétralement opposé fait mouvoir le vase en sens contraire de l'écoulement.

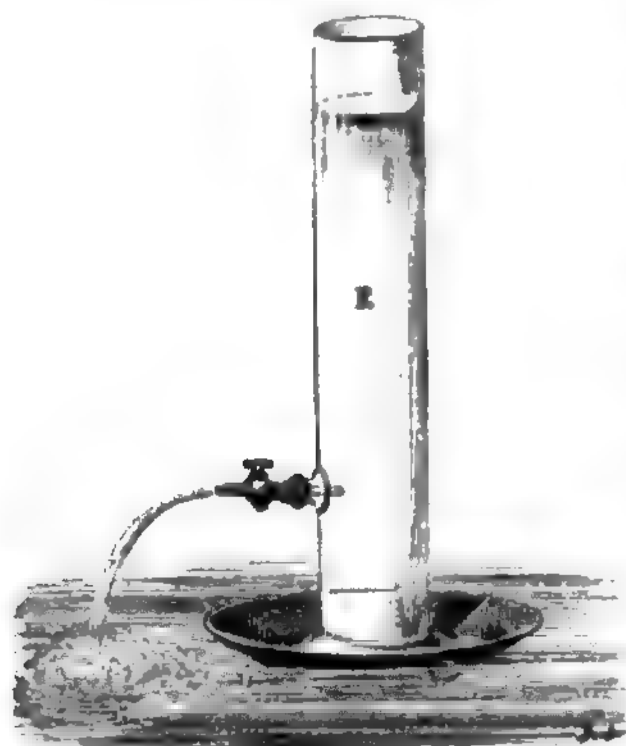


Fig. 61. — Réaction due à l'écoulement.

Cette observation explique le jeu de l'appareil appelé *tourniquet hydraulique*. Il se compose (fig. 62) d'un vase mobile autour d'un axe

vertical et présentant à sa partie inférieure un tube recourbé en sens contraire à ses deux extrémités par lesquelles le liquide peut s'écouler. La réaction exercée sur les points opposés à ceux où a lieu l'écoulement détermine le mouvement de rotation de l'appareil.

Lorsque la vitesse d'écoulement est suffisamment grande le mouvement de rotation peut être utilisé industriellement; on a proposé et essayé plusieurs fois des moteurs hydrauliques fondés sur ce principe; la turbine Burdin est un moteur de ce genre.



Fig. 62 — Tourniquet hydraulique.

72. Centre de pression. — Lorsqu'on considère en particulier la pression exercée par un liquide sur une paroi plane, les diverses pressions étant toutes parallèles entre elles, on peut se proposer de déterminer le point d'application de la pression résultante. Ce point porte le nom de *centre de pression*. Le centre de pression ne coïncide pas avec le centre de gravité, il est situé toujours au-dessous de ce dernier, puisque les forces élémentaires qu'il faut composer pour l'obtenir, au lieu d'être réparties d'une manière uniforme sur la surface, vont en croissant avec la profondeur.

La recherche des centres de pression constitue un chapitre particulier de la *mécanique rationnelle*, et nous ne nous en occuperons pas ici; nous examinerons seulement un cas particulier, propre à fixer les idées sur ce point.

Soit une paroi rectangulaire RB baignée par un liquide, qui

s'élève jusqu'en R; ce sera, par exemple, une vanne ou une porte de barrage destinée à retenir l'eau. La pression va en croissant depuis le point R, où elle est nulle, jusqu'en B, où elle possède sa valeur maxima; elle a la même valeur sur une même horizontale, et se trouve d'ailleurs en chaque point proportionnelle à la distance qui sépare ce point de la surface libre. Si donc nous menons au point B une perpendiculaire B*b* égale à RB et que nous joignions R*b*, les diverses parallèles D*d*, H*h*, L*l*, dans le triangle RB*b*, seront la mesure proportionnelle des pressions qui s'exercent aux points D, H, L. La composition de ces pressions revient donc à trouver le centre de gravité du triangle R*b*B; mais celui-ci est situé au tiers de la hauteur : le centre de pression se trouvera donc au tiers de la hauteur RB. La raison de symétrie indique du reste qu'il sera sur la ligne qui joint les milieux des côtés supérieur et inférieur du rectangle.

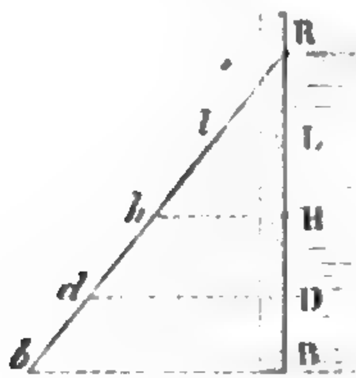


Fig. 63. — Centre de pression.

Quant à la pression totale que supporte la paroi RB, on peut l'évaluer dans le cas particulier que nous traitons en remarquant que, la pression croissant uniformément depuis R jusqu'à B, on pourra supposer qu'elle est constante en tous les points et égale à la valeur qu'elle possède au point milieu. La surface est donc dans le même cas que si elle était pressée sur tous ses points par une hauteur d'eau égale à la moitié de RB.

Supposons la hauteur RB égale à 3 mètres et la largeur égale à 5 mètres. La pression totale sera représentée par le poids de $5 \times 1,5 = 7,5$ mètres cubes d'eau, soit 7,500 kilogrammes.

Remarquons que le milieu de la hauteur du rectangle correspond précisément au centre de gravité de la figure et que par suite on peut dire que *la pression totale supportée par la paroi rectangulaire est égale au poids d'une colonne liquide qui aurait pour base sa surface même et pour hauteur la distance du centre de gravité à la surface libre.*

On démontre en mécanique que cette proposition est entièrement générale et qu'elle exprime la valeur de la pression totale qui s'exerce sur une surface quelconque, plane ou courbe, baignée par un liquide.

CHAPITRE IX.

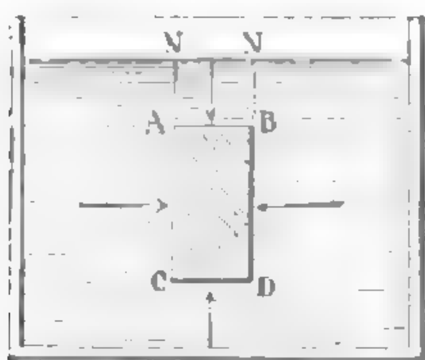
PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

73. Poussée. — Lorsqu'un corps est plongé dans l'intérieur d'un liquide, il éprouve sur les différents points de sa surface des pressions dont l'intensité et la direction sont soumises aux règles qui ont été posées dans le chapitre précédent. Comme ces pressions croissent avec la profondeur, on voit évidemment que celles qui tendent à soulever le corps l'emportent sur celles qui tendent à l'enfoncer, de sorte que l'effet résultant est une force dirigée en sens contraire de la pesanteur; cette force se nomme la *poussée du liquide.*

En employant une analyse analogue à celle dont il est question au § 70, on démontre que cette poussée est exactement égale au poids du liquide dont le corps tient la place.

Cette conclusion peut se vérifier très-aisément dans quelques cas simples. Soit, par exemple (fig. 64), un cylindre droit vertical plongé dans un liquide, et examinons l'effet des diverses pressions que ce liquide exerce sur sa surface. Il est évident d'abord que si l'on considère un point de la surface latérale, la pression normale et horizontale qui s'exerce sur lui est détruite par la pression égale et contraire qui se produit au point diamétralement opposé; comme il en est de même de tous les points analogues, on voit que toutes les pressions horizontales se détruisent mutuellement. Quant aux pressions verticales qui s'exercent sur les bases, l'une, celle que supporte la base supérieure AB, est dirigée de haut en bas et égale au poids de la colonne liquide ABNN; l'autre, exercée sur la base

inférieure CD, est dirigée de bas en haut et égale au poids de la colonne liquide CNND; cette dernière l'emporte sur la précédente précisément du poids du cylindre liquide ABCD, de sorte que l'effet résultant de la pression est de soulever le corps avec une force égale au poids du liquide dont il tient la place.



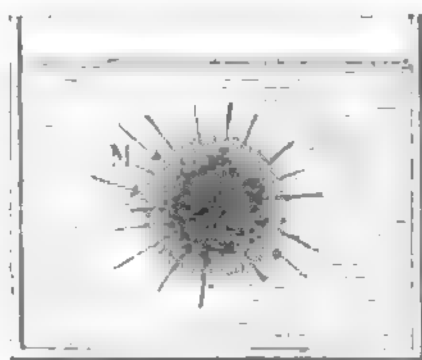


Fig. 64. Principe d'Archimède. Fig. 65.

On peut par un raisonnement synthétique, et sans avoir recours à l'analyse des diverses pressions, montrer que cette conclusion est absolument générale. Soit en effet une masse liquide en équilibre et considérons en particulier la portion M (fig. 65); celle-ci est aussi en équilibre. Si nous imaginons que, sans changer d'ailleurs ni de volume ni de nature, elle devienne solide, l'équilibre subsistera toujours. Or cette masse est pesante, et puisqu'elle ne tombe pas, il faut en conclure que l'effet des pressions qui s'exercent sur sa surface est de produire une poussée exactement égale et contraire à son poids. Si on suppose maintenant que M soit remplacé par un corps qui en occupe exactement la place, les pressions extérieures restant les mêmes, leur effet résultant sera le même aussi, c'est-à-dire que le corps sera soumis à une poussée égale au poids du liquide déplacé.

On peut remarquer que, quelle que soit la position de la masse M, l'équilibre aura toujours lieu, ce qui veut dire que la poussée passe toujours par son centre de gravité. On appelle *centre de poussée ou de pression* le centre de gravité du liquide déplacé par un corps immergé, et l'on voit que l'on peut toujours supposer que c'est en ce point qu'est appliquée la poussée du liquide. On peut donc résumer dans la proposition suivante le résultat des explications qui précèdent :

Tout corps plongé dans un liquide est soumis à une poussée verti-

cale, dirigée de bas en haut, égale au poids du liquide déplacé et appliquée au centre de gravité de la masse liquide.

Cette proposition constitue le célèbre principe d'Archimède. On l'énonce souvent en disant que *tout corps plongé dans un liquide perd de son poids un poids égal à celui du liquide dont il tient la place.* Bien que moins correct peut-être, cet énoncé est au fond identique avec le précédent, car si l'on vient à peser un corps plongé dans un liquide, le poids sera évidemment diminué d'une quantité égale à la poussée.

74. Démonstration expérimentale du principe d'Archimède. — On exécute ordinairement dans les cours de physique l'expérience suivante, qui donne une démonstration expérimentale du principe d'Archimède :

On suspend à l'un des plateaux d'une balance hydrostatique un

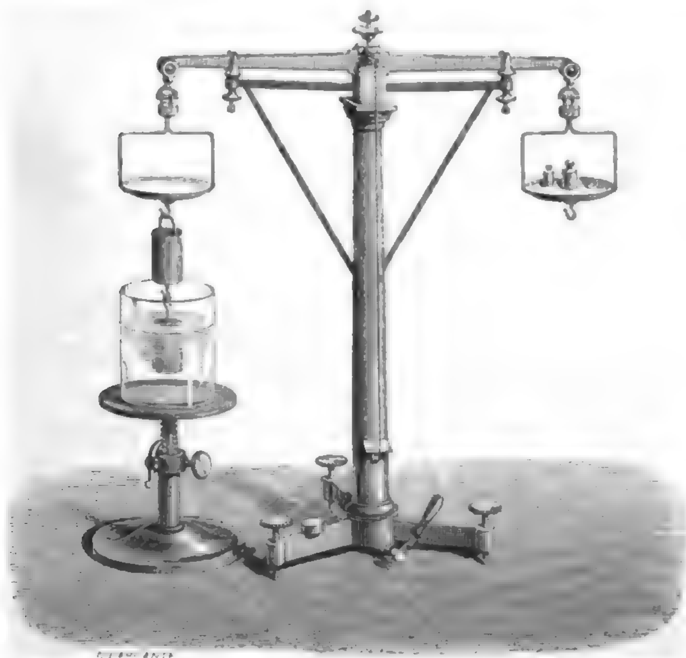


Fig. 66. — Démonstration expérimentale du principe d'Archimède.

cylindre creux en cuivre et au-dessous un cylindre plein d'un volume extérieur égal au volume intérieur du cylindre creux; on fait équilibre par une tare convenable mise dans l'autre plateau. Cela

fait, on dispose au-dessous des cylindres un vase contenant de l'eau dans lequel on fait plonger le cylindre inférieur. L'équilibre est immédiatement rompu et la poussée fait incliner le fléau du côté du plateau où se trouve la tare. Si alors on verse de l'eau dans le cylindre creux, l'équilibre se rétablit graduellement, et si le vase a été placé à la hauteur convenable, on voit que le fléau redevient horizontal lorsque d'une part le cylindre creux est plein d'eau, et que de l'autre le cylindre plein plonge exactement dans le liquide. La poussée qu'éprouve ce dernier est donc égale au poids de l'eau que l'on a ajoutée, c'est-à-dire au poids du liquide qu'il déplace.

75. Corps plongé dans un liquide. — Il résulte du principe d'Archimède que, quand un corps est plongé dans un liquide, il est soumis à deux forces : l'une, égale à son poids, appliquée à son centre de gravité et qui tend à le faire descendre; l'autre, égale au poids du liquide déplacé, appliquée au centre de pression et qui tend à le faire monter. Il peut dès lors se présenter trois cas différents :

1° Le poids du corps est plus grand que le poids du liquide déplacé, en d'autres termes la densité moyenne du corps est plus grande que celle du liquide; dans ce cas, le corps descend dans l'intérieur du liquide, comme le fait, par exemple, un morceau de plomb que l'on abandonne dans l'eau.

2° Le poids du corps est moindre que celui du liquide déplacé; dans ce cas, il s'élève, sort en partie du liquide lui-même, jusqu'à ce que le poids du liquide déplacé soit égal au sien. C'est ce qui arrive, par exemple, si on plonge un morceau de liége dans l'eau et qu'on l'abandonne à lui-même.

3° Le poids du corps est égal au poids du liquide déplacé; dans ce cas, les deux forces contraires étant égales, le corps se place dans une position convenable (77) et se maintient en équilibre.

Ces trois cas se réalisent dans les expériences suivantes (fig. 67) :

1° On place un œuf dans une éprouvette contenant de l'eau; il descend au fond du vase, sa densité moyenne étant un peu supérieure à celle du liquide.

2° Au lieu d'eau ordinaire, on se sert d'eau salée; l'œuf vient flotter à la surface du liquide, qui est un peu plus dense que lui.

3° On verse avec précaution l'eau ordinaire sur l'eau salée, il se fait un mélange des deux liquides dans les parties qui sont en contact; et si on met l'œuf dans la partie supérieure, on le voit des-

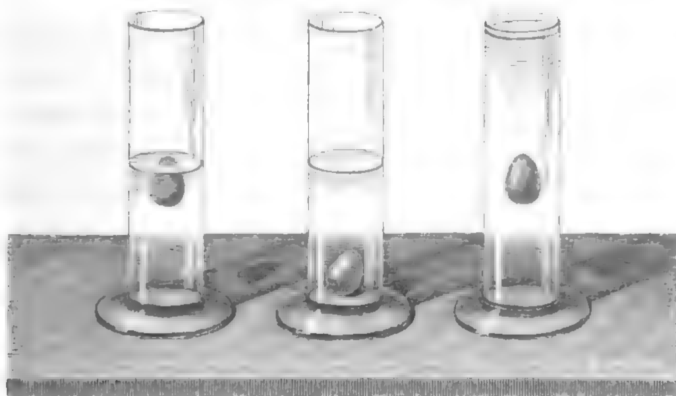


Fig. 67. — Œuf plongé dans l'eau et l'eau salée.

cendre et, après quelques mouvements d'oscillation, se fixer dans une couche où il déplace un volume de liquide dont le poids est égal au sien. Il est à remarquer que l'œuf présente dans ces conditions un équilibre *stable* ; car s'il s'élève, la poussée devenant moindre, son poids tend à le faire redescendre; si au contraire il s'abaisse, la poussée augmente et tend à le faire remonter.

76. Ludion. — L'expérience du *ludion*, qui se trouve décrite dans les anciens traités de physique, nous montre également les différents cas qui peuvent se présenter dans l'immersion d'un corps. Le ludion (fig. 68) est formé d'une boule creuse au bas de laquelle se trouve une petite ouverture 0; une figurine en émail est fixée à la boule et le tout flotte sur l'eau que renferme une éprouvette, dont l'ouverture est fermée par une membrane ou une lame de caoutchouc. Si l'on appuie la main sur la membrane, on comprime l'air, et la pression, se transmettant dans les diverses couches, détermine la compression de l'air contenu dans la boule et par suite l'entrée d'une portion de liquide par l'ouverture 0; le système devient plus lourd, et par suite de cet accroissement de poids il se produit un mouvement descendant du ludion. Lorsqu'on cesse d'appuyer sur la membrane, la pression redevient ce

qu'elle était, de l'eau sort de la boule et le ludion remonte. Il faut remarquer toutefois qu'à mesure que le ludion descend, l'eau continue à pénétrer dans la boule par suite de l'accroissement de pression, de sorte que si la profondeur de l'appareil dépassait une certaine limite, le système ne pourrait plus remonter.



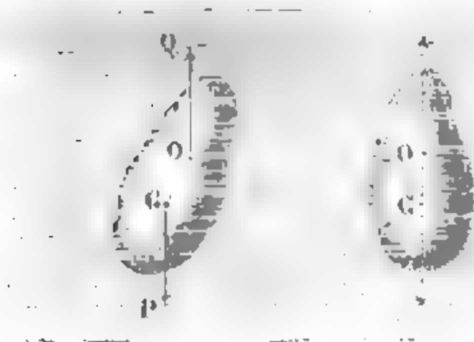
Fig. 68. — Ludion.

Si l'on imagine qu'à un certain moment le poids du ludion devienne égal exactement au poids du liquide déplacé, il y aurait équilibre; mais, contrairement à ce qui a lieu dans l'expérience citée (75), cet équilibre serait évidemment *instable*, car un petit mouvement dans un sens quelconque produirait une force dont le résultat serait la continuation du mouvement lui-même.

77. Position relative du centre de gravité et du centre de pression. — Pour qu'un corps flottant dans l'intérieur ou à la surface d'un liquide soit en équilibre, il faut évidemment que son poids soit égal au poids du liquide déplacé. Cette condition, qui est absolument nécessaire, n'est toutefois pas suffisante : il faut encore que l'action de la poussée soit directement contraire à celle du poids, c'est-à-dire que le centre de gravité et le centre de pression soient sur une même verticale; car s'il n'en était pas ainsi, les deux forces contraires formeraient un couple dont l'effet serait évidemment de faire tourner le corps.

Quand il s'agit d'un corps complétement immergé, il faut en

outre que *le centre de gravité soit au-dessous* du centre de pression; on voit en effet par la figure 69 que dans toute autre position que celle qui convient à l'équilibre, l'effet des deux forces appliquées aux deux points G et O sera de faire tourner le corps en amenant le centre de gravité dans la région inférieure. Mais il n'en est plus de même quand le corps sort en partie du liquide, ce qui arrive le plus ordinairement. Dans ce cas, il peut arriver sans



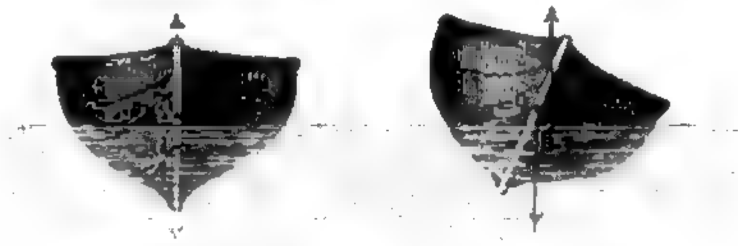


Fig. 69. Fig. 70.

Positions relatives du centre de gravité et du centre de pression.

doute que, l'équilibre étant stable, le centre de gravité soit au-dessous du centre de pression, mais cela n'est point nécessaire, et dans la plupart des circonstances il n'en est pas ainsi. Soit, par exemple (fig. 70), la partie inférieure d'un corps flottant, d'un navire par exemple; le centre de poussée est en O, le centre de gravité en G bien au-dessus; si le corps vient à se déplacer et à prendre la position indiquée par la figure, on voit que l'effet des deux forces agissant en O et en G est de ramener le corps à sa position initiale. Cette différence avec ce qui arrive lorsque le corps est complétement immergé tient à ce que, dans le cas du corps flottant, la figure du liquide déplacé change avec le mouvement du corps, et le centre de pression se trouve rejeté du côté où le corps plonge davantage. Il suit naturellement de là que la poussée agit en sens contraire du mouvement produit et tend à rétablir l'équilibre primitif.

78. Nécessité d'abaisser le centre de gravité. — La recherche des conditions de la stabilité de l'équilibre d'un corps flottant constitue une des questions les plus délicates de la mécanique rationnelle, et nous n'en parlerons pas davantage ici. Nous devons faire remarquer toutefois que, dans tous les cas, lorsque l'équilibre d'un corps flottant est troublé par une cause quelconque, il tend à se

rétablir avec une force d'autant plus grande, que le centre de gravité est situé plus bas; aussi importe-t-il, si l'on veut éviter que le corps chavire, d'abaisser autant que possible son centre de gravité. C'est là le principe de l'utilité du lest. C'est cette considération qui domine toutes les règles techniques relatives à l'*arrimage* ; on désigne ainsi la disposition des objets de chargement à bord d'un navire. Ces règles sont naturellement variables suivant les circonstances, mais elles doivent toujours, si elles sont rationnelles, avoir pour résultat d'abaisser le plus possible le centre de gravité de la masse flottante.

79. Phénomènes en contradiction avec le principe d'Archimède. — Un corps ne saurait flotter sur un liquide, à moins d'avoir une densité plus faible que celle du liquide lui-même. Cette conséquence naturelle du principe d'Archimède est en contradiction avec des faits bien connus. Ainsi, par exemple, si l'on pose avec précaution des aiguilles d'acier suffisamment fines à la surface de l'eau, elles y demeurent en équilibre (fig. 71). C'est en vertu d'un phénomène analogue que plusieurs insectes *marchent* sur l'eau (fig. 72), qu'un grand nombre de corps, de nature tout à fait quelconque, pourvu qu'ils soient *très-ténus*, peuvent être, pour ainsi dire, posés à la surface d'un liquide sans pénétrer dans son intérieur. Ces faits curieux sont dus en partie à la légèreté absolue des corps dont il s'agit. La force avec laquelle ils agissent sur les molécules liquides est insuffisante pour vaincre leur cohésion mutuelle; celles-ci ne se séparent point, le corps ne se trouve pas mouillé, et il se forme autour de lui une dépression, une sorte de bassin au fond duquel il repose. La courbure de la surface liquide, dans le voisinage du

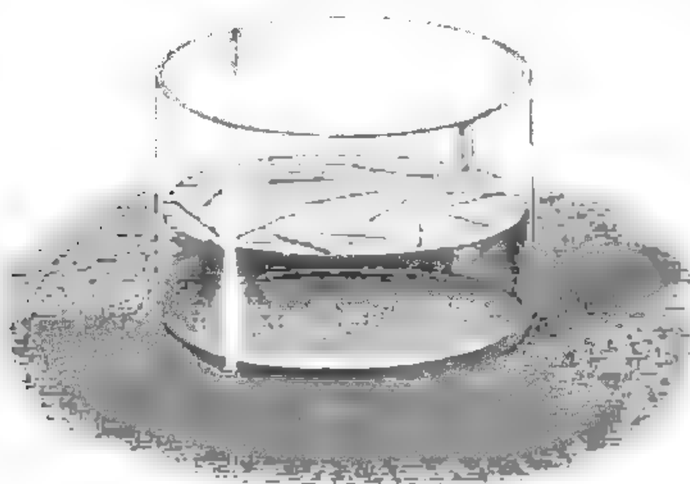


Fig. 71. — Aiguilles d'acier flottant sur l'eau.

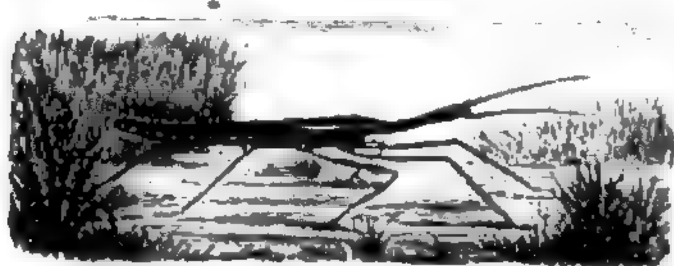


Fig. 72. — Hydromètre marchant sur l'eau.

corps, est rendue très-sensible par l'observation de l'ombre portée par le corps flottant, quand il est éclairé par le soleil; on la voit bordée de bandes lumineuses qui sont dues à la réfraction des rayons de lumière dans la portion du liquide terminée par une surface curviligne.

L'existence de la dépression autour du corps flottant permet de ramener la condition d'équilibre, dans ce cas particulier, à l'énoncé général du principe d'Archimède. Soit en effet M la section du corps, CD la distance à laquelle s'étend la dépression et AB la portion correspondante d'une couche de niveau quelconque; la pression exercée sur chacun des points de AB devant être la même que dans les autres parties de la couche, le liquide agit exactement de la même façon que si, M n'existant pas, la cavité était remplie par le liquide lui-même. On peut donc dire encore que le poids du corps flottant est égal au poids du liquide déplacé, en entendant ici par ces mots le liquide qui occuperait la totalité de la dépression due à la présence du corps.



Fig. 73.

80. Liquides superposés. — Lorsqu'on place dans un même vase des liquides de densité différente, les particules des liquides les plus denses se réunissent et se rendent à la partie inférieure de la même façon qu'un corps solide s'en fonce dans un liquide plus léger; finalement les liquides se placent dans l'ordre de leurs densités respectives, les surfaces de séparation étant horizontales. On vérifie le fait à l'aide de la fiole dite *des quatre éléments*. C'est un flacon (fig. 74) contenant du mercure, de l'eau et de l'huile. Dans l'état d'équilibre, le mercure occupe la région inférieure, l'huile la partie supérieure, et l'eau la portion moyenne; si l'on agite le flacon, les liquides se mêlent momentanément, mais par le repos ils ne tardent pas à reprendre leurs places primitives.


Fig. 74.
Fiole des quatre éléments.

On voit aisément, d'après les règles ordinaires de l'hydrostatique, que la surface de séparation des deux liquides différents doit être horizontale. Soient en effet deux liquides contenus dans un vase (fig. 75); la surface libre est nécessairement horizontale. Or, si on prend sur une couche de niveau dans le liquide inférieur deux éléments superficiels égaux *n* et *n'*, les pressions qu'ils supportent doivent être égales ; d'ailleurs, ces pressions sont mesurées par les poids des cylindres liquides *n r s*, *n' t l*; et ces derniers ne sauraient être égaux qu'au tant qu'il y a au-dessus des points *n* et *n'* une même hauteur du liquide inférieur. Ceci s'applique naturellement à tous les points de la couche de niveau qui doit par conséquent être à une distance constante de la surface de séparation, ce qui veut dire, en d'autres termes, que celle-ci est horizontale.

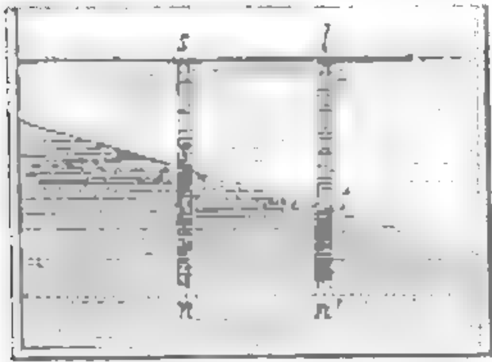


Fig. 75.

Cette propriété ne peut se vérifier qu'autant que les liquides ne sont pas susceptibles de se dissoudre mutuellement ou, à plus forte raison, d'agir chimiquement l'un sur l'autre. Ainsi, en versant avec précaution de l'alcool sur de l'eau que contient déjà un verre, on verra les deux liquides séparés par une couche horizontale; mais qu'on agite et il se formera un liquide unique résultant de leur dissolution mutuelle, et dont les éléments ne se sépareront plus.

Si l'agitation est insuffisante, le mélange intime ne sera que partiel dans la région du contact, et il y aura deux couches séparées par une zone intermédiaire de densité variable. C'est ce qui arrive dans une embouchure de rivière, l'eau douce forme à la surface de l'eau de mer une couche dont la base est en partie mêlée avec l'eau salée.

CHAPITRE X.

APPLICATION DU PRINCIPE D'ARCHIMÈDE A LA MESURE DES DENSITÉS. — ARÉOMÈTRES.

81. Mesure des densités. — On a vu dans le chapitre VII que pour déterminer la densité d'un corps il suffit de mesurer le rapport qui existe entre le poids d'un certain volume de ce corps et le poids d'un égal volume d'eau. Le principe d'Archimède permet d'effectuer cette mesure très-aisément; toutefois le procédé auquel il donne lieu n'a ni la commodité ni l'exactitude de celui qui a été décrit dans le chapitre cité.

1° *Corps solides.* — Soit un morceau de cuivre dont on veut déterminer la densité; on le suspend par un fil très-fin à l'un des plateaux d'une balance (fig. 76) et on en détermine le poids que l'on trouve égal, par exemple, à $125^{gr},35$. On fait ensuite plonger le corps dans l'eau : l'équilibre est rompu à cause de la poussée du liquide, et pour le rétablir on est obligé d'ajouter au plateau qui soutient le corps un poids de $14^{gr},24$, qui représente, d'après le principe d'Archimède, le poids d'un volume d'eau égal à celui du corps. La densité du cuivre est donc $\frac{125,35}{14,4} = 8,8$.

2° *Corps liquides.* — On suspend à l'un des plateaux de la balance (fig. 77) un corps quelconque, qui ne puisse toutefois être attaqué par les liquides dans lesquels on doit l'immerger; une boule de verre lestée intérieurement avec du mercure convient très-bien pour cela. On en fait la tare exacte; on la fait ensuite plonger dans le liquide dont on veut déterminer la densité, l'alcool par exemple;

il se produit une poussée, et pour rétablir l'équilibre on est obligé d'ajouter dans le plateau un poids de $35^{gr},43$. On répète l'expérience en faisant plonger la boule dans l'eau, la poussée est plus forte, et

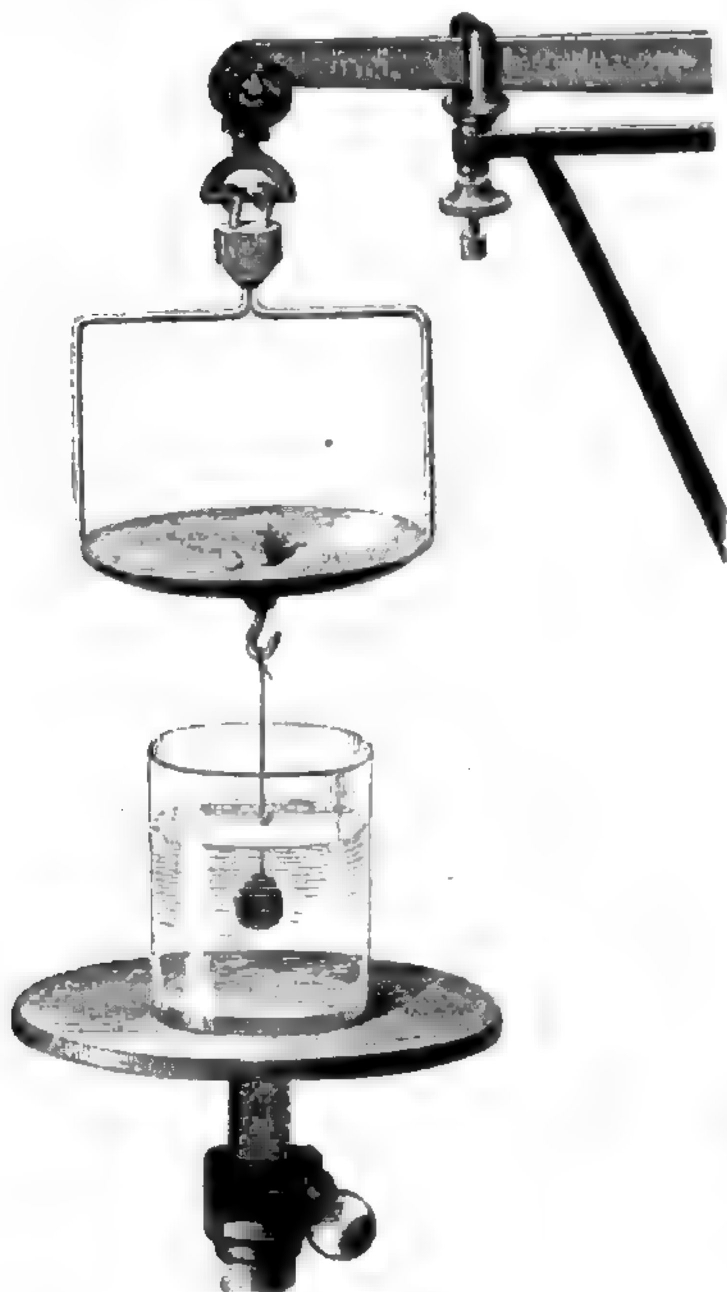


Fig. 76. — Mesure de la densité d'un solide.

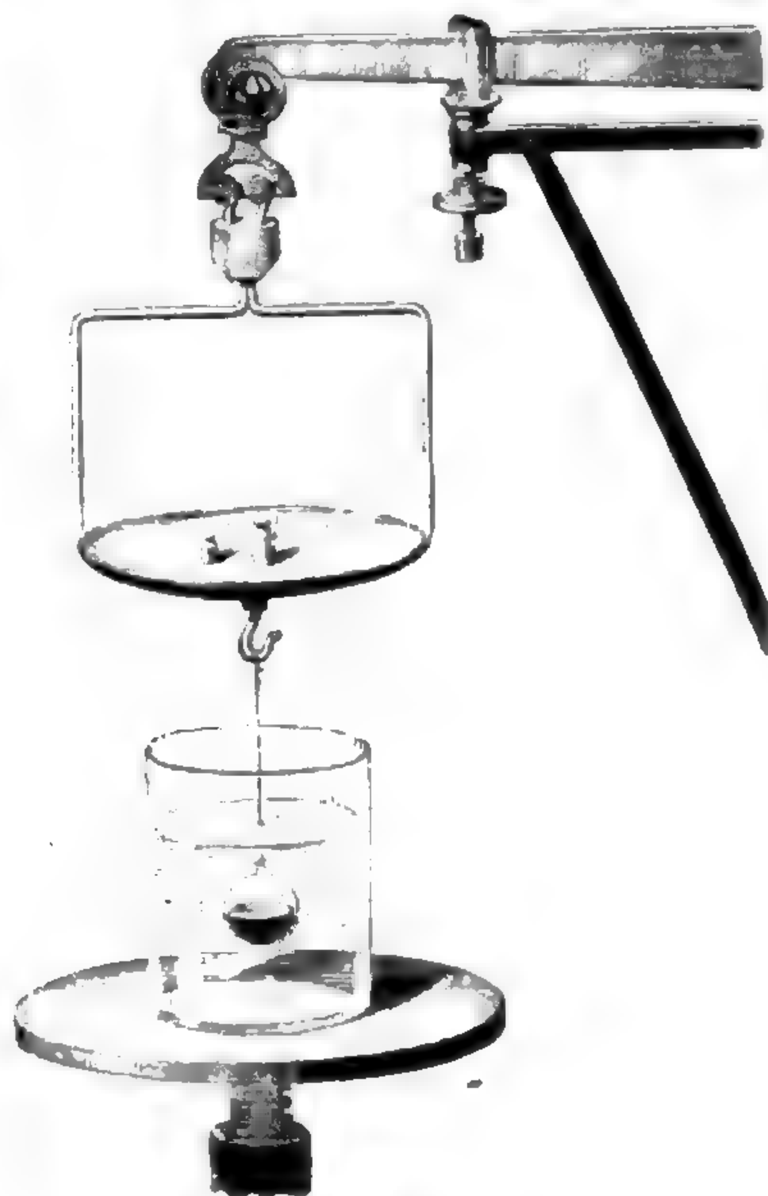


Fig. 77. — Mesure de la densité d'un liquide.

pour rétablir l'équilibre il faut un poids de $44^{gr},28$. Les poids $44^{gr},28$ et $35^{gr},43$ sont les poids de volumes égaux d'eau et d'alcool; la densité de ce dernier liquide est donc $\frac{35,43}{44,28} = 0,8$.

82. Balance ou aréomètre de Nicholson. — Cet appareil, sorte de balance portative, est formé (fig. 78) d'un corps cylindro-conique en métal, terminé supérieurement par une tige surmontée d'un petit disque, et inférieurement par une sorte de corbeille. Cette dernière est lestée de façon que, l'instrument étant plongé dans l'eau, il faille mettre sur le disque supérieur un poids de 100 grammes par exemple pour le faire affleurer à un point de repère tracé sur la tige. On place, je suppose, un morceau de plomb sur le disque,

et pour produire l'affleurement, au lieu de 100 grammes, il ne faut que 94gr,52; c'est que le poids du plomb est de 5gr,48. On place ensuite ce dernier à la partie inférieure de l'instrument, il se produit

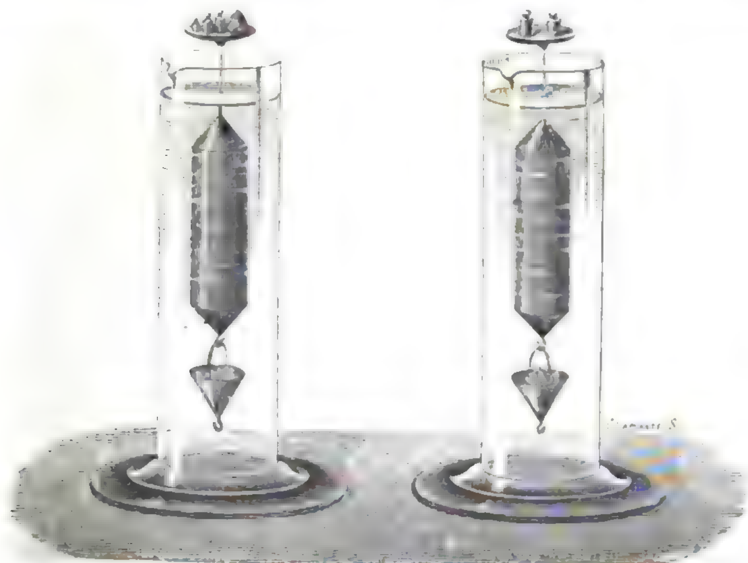


Fig. 78. — Balance de Nicholson.

une poussée qui soulève l'appareil, on rétablit l'affleurement à l'aide d'un poids égal à 0gr,482. C'est le poids d'un volume d'eau égal à celui du plomb. La densité de ce dernier est donc $\frac{5,48}{0,482} = 11,36$.

Cet appareil, un peu préconisé autrefois, est d'un maniement incommode et présente peu d'exactitude à cause de l'adhérence capillaire du liquide pour la tige. Cette adhérence est d'ailleurs perpétuellement variable par suite des mouvements de l'instrument qui modifient d'une façon continuelle la forme de la surface liquide.

83. Aréomètre de Fahrenheit. — Les mêmes observations s'appliquent à l'aréomètre de Fahrenheit (fig. 79). Le corps, ordinairement en verre, se termine inférieurement par une boule lestée et supérieurement par une sorte de petite cuvette. Supposons que le poids de l'instrument soit de 60 grammes et que, pour le faire affleurer dans l'eau jusqu'au point de repère, il faille mettre sur la partie supérieure 40 grammes : c'est que le poids du volume d'eau déplacé

est égal à 100 grammes. Pour le faire affleurer dans l'alcool, par exemple, il ne faut que 20 grammes, ce qui veut dire que le poids d'un volume égal d'alcool est de $60 + 20 = 80$ grammes. La densité de ce liquide est donc $\frac{80}{100} = 0{,}8$.



Fig. 79. — Aréomètre de Fahrenheit.

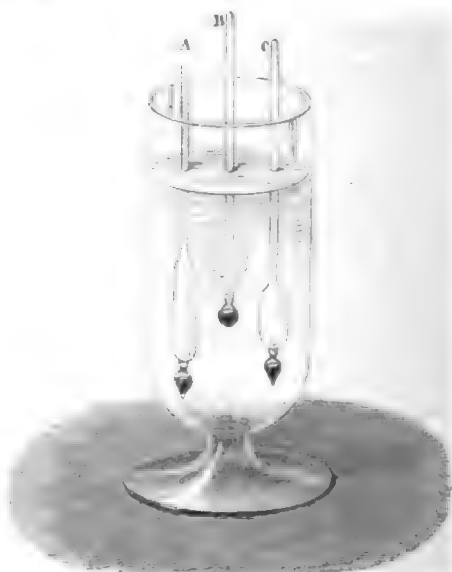


Fig. 80. — Aréomètres.

84. Aréomètres. — On désigne sous le nom d'*aréomètres* des appareils fort anciennement connus et employés pour apprécier la densité des liquides. Ce sont des instruments toujours à peu près semblables à ceux A, B, C que représente la figure 80; on les construit le plus souvent en verre, quelquefois en métal; on choisit dans ce cas des métaux peu altérables, tels que l'argent, le cuivre ou le maillechort. La tige porte une graduation qui permet de constater le point d'affleurement qui se produit dans un liquide donné. Il est clair que l'instrument s'enfonce d'autant plus que le liquide est moins dense, et réciproquement, puisque dans tous les cas le poids du liquide déplacé doit être égal au poids de l'instrument lui-même. Si l'on imagine par conséquent que la graduation ait été faite de telle façon que les différents instruments soient comparables entre eux, c'est-à-dire que dans des liquides de même densité ils marquent le même

degré, on pourra vérifier la densité d'un liquide à l'aide d'une simple immersion de l'aréomètre, opération pas très-précise sans doute, mais extrêmement simple à exécuter. Aussi ces instruments sont-ils d'un usage continuel dans le commerce et l'industrie.

85. Pèse-sel et pèse-liqueur de Baumé. — Les deux appareils imaginés par le savant français Baumé vers la fin du dernier siècle sous les noms de *pèse-sel* et *pèse-liqueur* réalisent les conditions indiquées précédemment, et s'ils donnent souvent des indications peu exactes, ce n'est pas que leur principe ne soit irréprochable, mais bien parce qu'on apporte généralement peu de soin dans leur construction.


Fig. 81. Pèse-sel.

Le pèse-sel, qu'on appelle aussi *pèse-acide*, *pèse-sirop*, *pèse-vinaigre*, etc., et qui est destiné aux liquides plus denses que l'eau, est construit de façon que, plongé dans l'eau à la température de 12°, il s'affleure à peu près vers le haut de la tige en un point où l'on marque 0 ; on le plonge ensuite dans une dissolution de 15 parties de sel dans 85 parties d'eau dont la densité est 1,116 environ et on marque 15 au nouveau point d'affleurement. On divise l'intervalle en 15 parties égales et on prolonge la division jusqu'au bas de la tige; la longueur de celle-ci varie suivant les cas : elle s'arrête assez ordinairement au degré 66, qui correspond à l'acide sulfurique, dont la densité est à peu près la plus grande de celles que l'on peut avoir à explorer. Il existe pour l'usage des laboratoires des tables qui donnent les densités correspondantes aux divers degrés marqués par le pèse-sel; on peut aussi se servir de la formule $D = \frac{144}{144 - N}$.

Dans le *pèse-liqueur* ou le *pèse-éther* le point d'affleurement dans l'eau, situé vers le bas de la tige, est marqué 10; le zéro correspond au point d'affleurement dans une dissolution de 10 parties de sel dans 90 parties d'eau dont la densité est environ 1,085. L'affleurement au degré N correspond à une densité donnée par la formule $D = \frac{128}{118 + N}$.

Les expressions usitées pour caractériser les différents alcools, *alcool à* 36°, *alcool à* 40°, sont empruntées à l'échelle du pèse-liqueur de Baumé, ou plutôt à celle d'un instrument qui n'en est qu'une modification insignifiante et qui porte le nom de Cartier. Les bases de la graduation de Cartier n'ont jamais été ni bien connues ni bien fixées. Suivant Gay-Lussac, le degré 10 est sensiblement le même dans l'échelle de Cartier et celle de Baumé, et le 29ᵉ degré de Cartier correspond à peu près au degré 31 de Baumé.

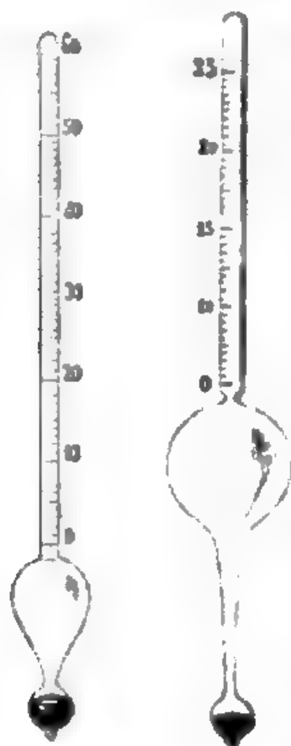


Fig. 82. Pèse-liqueur. Fig. 83. Pèse-éther.

86. Théorie générale des aréomètres. — Les formules indiquées dans le paragraphe précédent ne sont qu'un cas particulier d'une formule plus générale que nous allons faire connaître et qui constitue le résumé de la théorie des aréomètres.

Soit un aréomètre s'affleurant aux degrés n et n' dans deux liquides de densités d et d', et cherchons la densité x d'un liquide marquant un degré N. Si V et V' désignent les volumes de l'instrument jusqu'aux degrés n et n', on a, d'après le principe d'Archimède, $Vd = V'd'$, d'où $V - V' = V'\frac{d'-d}{d}$, d'où résulte que le volume d'une division est égal à $\frac{V'(d'-d)}{(n'-n)\,d}$.

Quand l'instrument s'affleure au degré N, la partie plongée a pour volume $V' - (N-n')\frac{V'(d'-d)}{(n'-n)\,d}$, et par suite le poids du liquide déplacé est égal à $\left[V' - (N-n')\frac{V'(d'-d)}{(n'-n)\,d}\right]x$; c'est la même quantité qui est représentée par Vd ou $V'd'$; on a donc

$$V'd' = x\left[V' - (N-n')\frac{V'(d'-d)}{d(n'-n)}\right],$$

d'où

$$x = \frac{d'}{1-(N-n')\dfrac{d'-d}{d(n'-n)}}.$$

Si dans cette formule générale on fait $d = 1$, $n = 0$, $d' = 1{,}116$, $n' = 15$, on obtient la formule du pèse-sel. On aura celle du pèse-liqueur en faisant $d = 1$, $n = 10$, $d' = 1{,}085$, $n' = 0$. On doit sur-

tout voir dans la formule la démonstration rigoureuse de ce fait que, quand on gradue un aréomètre à l'aide de deux points fixes correspondant à des liquides de densité connue, le degré d'affleurement dans un liquide quelconque définit rigoureusement sa densité; c'est là le principe théorique des appareils construits par Baumé.

87. Densimètres, volumètres. — Les nombres inscrits sur la tige du pèse-sel et du pèse-liqueur sont en réalité arbitraires; on aurait pu, tout en conservant le principe de la construction, changer la désignation des points fixes ou employer d'autres liquides que ceux qui ont été indiqués. Il peut être commode d'avoir en regard des divisions, soit la densité elle même, soit le volume de la partie immergée. On appelle densimètres et volumètres les instruments qui donnent l'une ou l'autre de ces indications.

Dans les densimètres les plus répandus, en regard du point d'affleurement se trouve le nombre qui exprime en grammes le poids du litre; ainsi la division correspondante à l'eau porte le chiffre 1,000, celle de l'acide sulfurique 1,840, etc. Les degrés croissent par centièmes, ce qui permet de moins surcharger l'échelle, en supprimant le dernier zéro.



Fig. 84. Densimètre de 1 à 1,5.

Les constructeurs n'emploient pas des procédés uniformes pour effectuer la graduation des densimètres. La méthode suivante est une des plus commodes. Supposons que l'on veuille construire une échelle pour des liquides dont la densité puisse être comprise entre celle de l'eau et celle de l'acide sulfurique, l'instrument est préparé de façon qu'en haut de la tige soit le point d'affleurement de l'eau, et en bas celui de l'acide.

On compose des dissolutions ayant des densités intermédiaires qu'on détermine par les procédés connus, et on constate directement les points d'affleurement R, L, K, I (fig. 85) dans ces liquides auxiliaires. En ces points et en B, on élève des perpendiculaires représentant, à une échelle déterminée, l'excès de la densité correspondante sur celle de l'eau, et on unit les extrémités de ces perpendiculaires par un trait continu; on obtient ainsi la courbe A I' K'... Si l'on prend alors sur la droite BC des hauteurs détermi-

nées 40, 60... qu'on mène par les points correspondants des parallèles à AB jusqu'à la rencontre de la courbe, et qu'on reporte les points d'intersection sur la droite AB elle-même, on détermine précisément les points de l'échelle qui correspondent aux densités 1,40, 1,60...

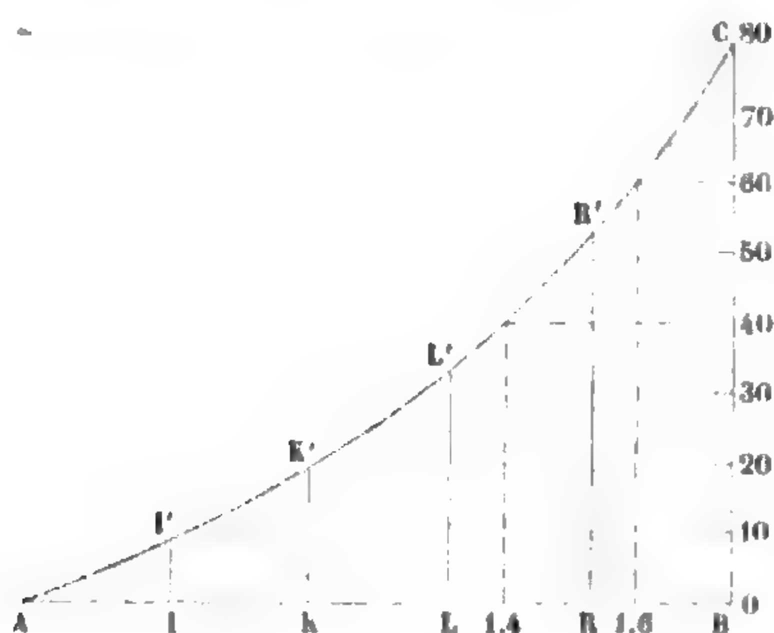


Fig. 85. — Graduation du densimètre.

La graduation des *volumètres* peut se faire directement par un procédé indiqué par Gay-Lussac. L'instrument étant lesté de façon que le point d'affleurement dans l'eau soit vers la partie supérieure de la tige, on marque en ce point le nombre 100 que l'on regarde comme l'expression du volume immergé. On compose ensuite une dissolution dont la densité soit $\frac{4}{3}$, on y plonge l'instrument qui s'y affleure à un point auquel on marque 75, nombre qui exprime encore le volume immergé. En effet, le poids du liquide déplacé étant le même dans les deux cas, le volume du second liquide, dont la densité est $\frac{4}{3}$, doit être les 3/4 seulement de celui de l'eau. On divise en 25 parties égales la longueur comprise entre 100 et 75, et on prolonge la division jusqu'au bas de la tige. Il suit de ce mode de graduation que le degré N d'affleurement dans un liquide quelconque exprime le volume de la partie plongée du volumètre, et que par conséquent la densité du liquide est $\frac{100}{N}$. Cette conclusion n'est légitime qu'autant que le tube est cylindrique. Cette condition devrait aussi être remplie par les tubes de tous les aréomètres; dans le fait il est loin d'en être ainsi, et c'est une des principales causes d'inexactitude de ces divers appareils.


Fig. 86. Volumètre.

88. Alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. — Les liquides

divers que l'industrie connaît sous les noms d'*alcools*, *esprits*, *eaux-de-vie*, etc., peuvent être considérés comme des mélanges en proportions variables d'alcool pur ou *absolu* et d'eau. Leur commerce est soumis à un droit considérable, qui est basé sur la quantité d'alcool réel qu'ils renferment, et qui s'élève aujourd'hui à environ 90 francs par hectolitre d'alcool pur.

L'appréciation du titre d'un esprit se faisait autrefois d'une façon assez incertaine, à l'aide du pèse-liqueur de Cartier; on emploie aujourd'hui, exclusivement pour cet objet, l'alcoomètre centésimal de Gay-Lussac. Cet instrument donne directement (du moins quand on observe à la température de 15°) la proportion en volume d'alcool réel que contient un alcool commercial; ainsi un esprit marquant 74° renferme 74 pour 100 en volume d'alcool pur. Au sommet de la tige se trouve le point 100 d'affleurement dans l'alcool absolu, et à la partie inférieure le point 0 d'affleurement dans l'eau pure. La détermination des degrés intermédiaires est assez délicate, parce que l'alcool est un liquide très-dilatable, et que quand on le mélange avec l'eau, il se produit à la fois et une contraction de volume et une élévation de température. Gay-Lussac n'a pas indiqué avec précision les détails de la méthode qu'il a employée; mais il est certain que son procédé est analogue à celui qui a été décrit pour le densimètre (87). Il consiste à composer des mélanges contenant un volume *déterminé* d'alcool et de l'eau; on attend que ces mélanges soient refroidis à 15°, et du volume qu'ils occupent alors on déduit la proportion centésimale d'alcool[1]. On note le point d'affleurement de l'instrument dans ces mélanges, et on détermine ainsi directement un certain nombre de points M, N, R, S de l'échelle. On élève en ces points des perpendiculaires MM', NN'... représentant la proportion en centièmes d'alcool, et on unit les extrémités de ces perpendiculaires par un trait continu. En divisant la ligne BC en 100 par-



Fig. 87. Alcoomètre.

1. Si, par exemple, à 500cc d'alcool pur on ajoute 460cc d'eau, on obtiendra après refroidissement un volume de 930cc, qui renferme par conséquent $\frac{500}{930} \times 100 = 53,7$ pour 100 d'alcool.

ties égales, menant par les points de division des parallèles à AB et rabattant les points d'intersection avec la courbe sur la droite AB, on a les degrés de l'échelle.

Les indications de l'alcoomètre se rapportent à la température de 15°; lorsqu'on observe à une température différente, il faut rectifier le degré marqué à l'aide de tables qui ont été dressées par Gay-Lussac.

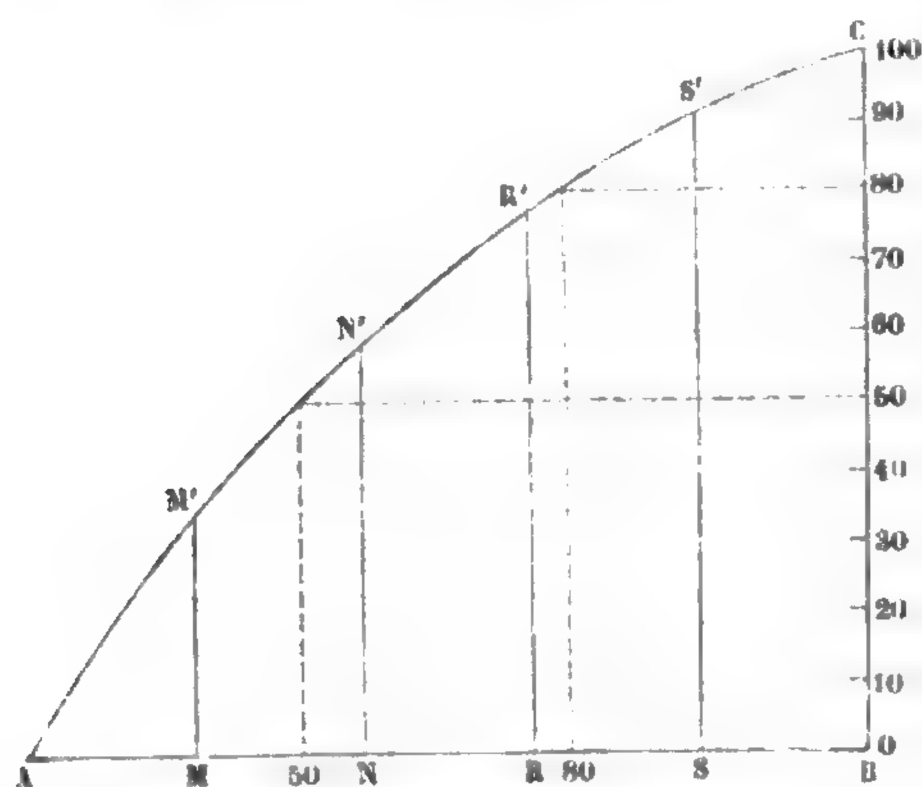


Fig. 88. — Graduation de l'alcoomètre.

Il importe de remarquer que l'échelle de l'alcoomètre centésimal ayant été construite avec des mélanges d'alcool et d'eau, ce n'est que pour les liquides de cette nature que l'instrument est directement applicable. Si l'on veut connaître la quantité d'alcool contenue dans un liquide, comme le vin par exemple, qui contient, outre l'eau et l'alcool, des substances diverses, il faut préalablement le soumettre à la distillation qui fournit un produit dans lequel la totalité de l'alcool se rencontre mêlé seulement avec une quantité variable d'eau. Une remarque du même genre doit être faite pour tous les aréomètres; ces instruments ne donnent que la densité et ne nous apprennent évidemment rien sur la nature du liquide. Une vérification aréométrique devient donc absolument illusoire au point de vue de la pureté d'un produit, s'il est possible par l'introduction de substances diverses de constituer la densité normale. Ainsi, par exemple, il serait tout à fait insuffisant d'exiger que le lait marque un degré donné au lactomètre, si l'on n'avait le soin de constater par un autre genre d'épreuves que la soustraction de la crème, opération qui augmente la densité du liquide, n'a pas été *compensée* par l'addition de l'eau qui produit un effet inverse.

CHAPITRE XI.

VASES COMMUNICANTS.

89. Équilibre dans les vases communicants. — Quand un liquide est enfermé dans des vases qui communiquent entre eux, il s'élève dans l'état d'équilibre à la même hauteur dans les diverses parties du système, de sorte que les surfaces libres se trouvent toutes dans un même plan horizontal.

C'est une conséquence directe de ce fait que la surface libre

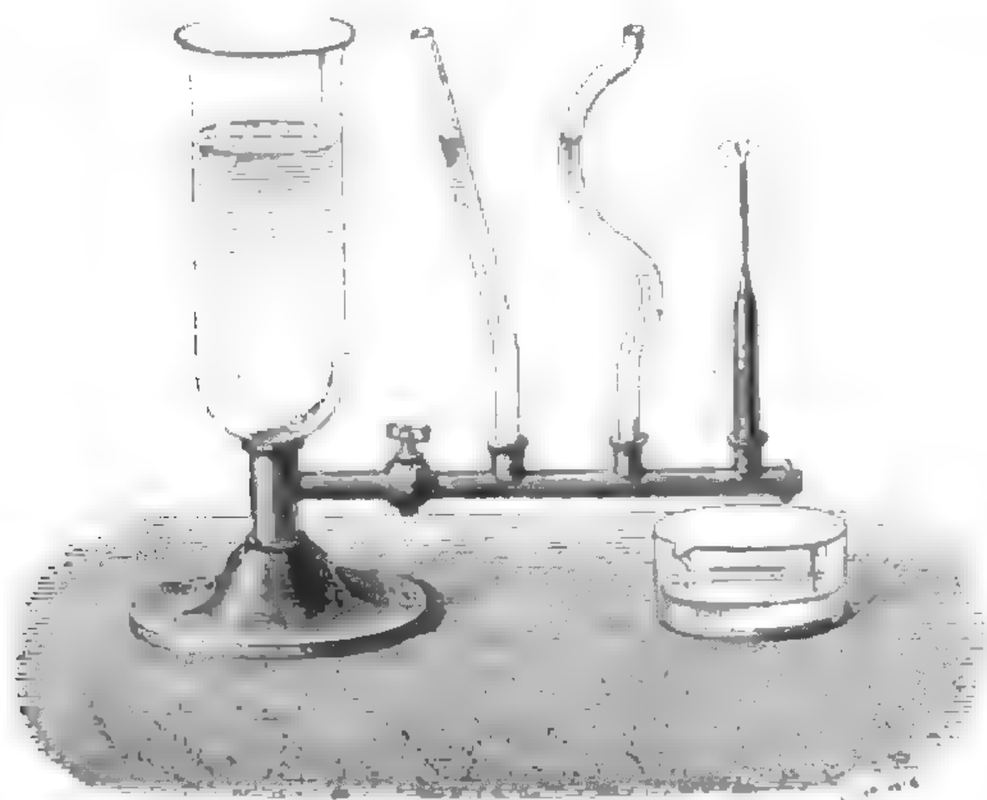


Fig. 89. — Vases communicants.

d'un liquide est toujours horizontale; car, à partir d'une couche de niveau placée dans la région inférieure du système, il faudra s'élever verticalement de la même quantité dans toutes les parties pour atteindre la surface libre qui correspond à une même pression.

Ainsi, dans le système que représente la figure 89, on voit le liquide s'élever à la même hauteur dans le vase principal et dans les tubes de forme variée qui sont en communication avec lui. Si l'un des tubes est coupé à une hauteur moindre que celle du liquide dans le vase principal et qu'on place à son extrémité un ajutage délié, on verra le liquide jaillir et s'élever à peu près à la hauteur du niveau dans ce vase.

Cette tendance des liquides à reprendre leur niveau est très-importante à connaître, elle est d'une application continuelle. Ainsi d'un réservoir d'eau peuvent partir des conduites diverses rayonnant dans toutes les directions possibles, et présentant telles circonvolutions que l'on voudra; pourvu que les extrémités de ces conduites soient situées au-dessous du niveau dans le réservoir, l'eau les atteindra et s'écoulera par elles. Toutefois la vitesse qu'elle possédera à sa sortie dépendra, indépendamment de la différence de niveau, de la forme et du développement des tuyaux. C'est cette vitesse qui sert de base à l'évaluation de la quantité d'eau écoulée dans un temps donné, et par suite aux règles de la distribution dans les concessions publiques; c'est elle aussi qui détermine la hauteur à laquelle l'eau devra jaillir, si l'on établit un jet d'eau à l'extrémité de la conduite.

90. Niveau d'eau. — L'instrument si connu sous le nom de



Fig. 90. — Niveau d'eau.

niveau d'eau est fondé sur la propriété que nous venons d'examiner. Il est formé d'un tube en métal *bb*, recourbé à angle droit à ses extrémités. Celles-ci se terminent par deux fioles *aa* de verre, forte-

ment rétrécies vers le haut et qui ont d'ailleurs le même diamètre. Le tube est porté par un pied à trois branches, surmonté supérieurement d'un genou qui permet de tourner l'appareil et de le placer dans une direction quelconque. On introduit dans le tube, toujours placé *à peu près* horizontalement, de l'eau, généralement un peu colorée, qui s'élève aux trois quarts environ de la hauteur dans les tubes de verre.

En vertu du principe de l'équilibre dans les vases communicants, les surfaces du liquide dans les deux branches sont sur un même plan horizontal, de telle sorte que si l'on dirige un rayon visuel *mn* qui rase les extrémités des colonnes liquides, on sera sûr que ce rayon est horizontal.

C'est là le principe du NIVELLEMENT, qui a pour objet de déterminer la différence de hauteur verticale, ou de *cote* de deux points



Fig. 91. — Nivellement.

donnés. Supposons qu'il s'agisse des deux points A et B (fig. 90). On plante en chacun de ces points une *mire,* c'est-à-dire une règle verticale divisée en parties d'égale longueur, sur laquelle peut se mouvoir une petite plaque carrée appelée *voyant,* dont le centre sert de point de visée.

Le niveau étant placé dans une station intermédiaire, on vise successivement sur chaque mire et on arrête le voyant dans la position pour laquelle la ligne de visée aboutit en son centre. On obtient ainsi deux hauteurs différentes sur la règle, dont la différence exprime évidemment la différence de niveau des deux points donnés.

Quand les points dont on veut connaître la cote relative sont trop éloignés, et présentent une différence de niveau plus grande que la longueur de la mire, on procède par stations successives et

on déduit la différence cherchée de la combinaison des cotes partielles.

91. Niveau à bulle d'air. — Ces observations se font d'une façon beaucoup plus exacte et plus commode avec le niveau à bulle d'air. Cet instrument se compose d'un tube de verre légèrement courbé, rempli d'un liquide qui est ordinairement l'alcool, à l'exception d'un petit espace occupé par une bulle d'air; ce tube est enchâssé dans une monture qui repose elle-même sur une plaque de laiton appelée platine.



Fig. 92. — Niveau à bulle d'air.

Supposons que le tube ait été travaillé de façon que le profil de son arête supérieure soit un arc de cercle et qu'on place l'instrument sur un plan horizontal (fig. 93). La bulle d'air devra se placer en MN à la partie culminante du tube, de sorte que les arcs MA et NB seront nécessairement égaux. Il suit de là que si on retourne le niveau de 180°, la bulle occupera la même position, le point N venant en M et *vice versa*. Il n'en serait pas ainsi dans le cas où AB serait incliné à l'horizon (fig. 94), car alors la distance MA étant différente de NB, après le retournement de l'appareil la bulle se placerait d'une façon symétrique sur le côté opposé du tube. La condition d'horizontalité de la ligne sur laquelle le niveau à bulle d'air est placé consiste donc en ce que, après le retournement, la bulle reste comprise entre les mêmes limites. Afin d'éviter cette opération du retournement, le constructeur marque sur le tube ou sur sa monture ces limites qu'on appelle repères, et pour s'assurer qu'une ligne est horizontale il suffit de constater qu'en plaçant sur elle le niveau, la bulle se place exactement entre ses repères.



Fig. 93.



Fig. 94.

Pour qu'une surface plane soit horizontale, il faut que deux

lignes tracées sur la surface soient horizontales elles-mêmes. On atteint méthodiquement ce résultat de la manière suivante : On supporte la surface à l'aide de trois vis calantes formant les trois sommets d'un triangle isocèle; on place d'abord le niveau parallèlement

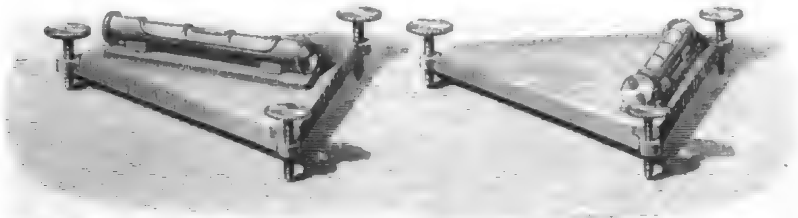


Fig. 95. — Emploi du niveau à bulle pour s'assurer qu'une surface est horizontale.

à la base du triangle et par le moyen de l'une des vis on amène la bulle entre ses repères. L'instrument est placé ensuite perpendiculairement à la première position, et la bulle est amenée entre les repères par l'action de la troisième vis; cette deuxième opération ne peut point troubler le résultat de la première, puisque le plan n'a fait que tourner autour d'une ligne horizontale comme charnière.

92. Niveau à lunette. — Pour appliquer le niveau à bulle aux opérations du nivellement, on se sert d'un appareil disposé comme celui que représente la figure. Sur un châssis AA mobile autour d'un axe vertical B sont disposés parallèlement l'un à l'autre un niveau à bulle d'air *nn* et une lunette LL. Cette dernière est munie à son foyer d'un réticule formé de deux fils très-fins dont le point de croisement détermine avec beaucoup de précision la ligne de visée. L'appareil, muni de vis calantes H, est porté par un support à trois branches, et l'on peut, en le faisant tourner autour de son axe, viser les différents points de l'horizon. Par un réglage dont nous n'avons pas ici à donner le détail, on s'est assuré que lorsque la bulle du

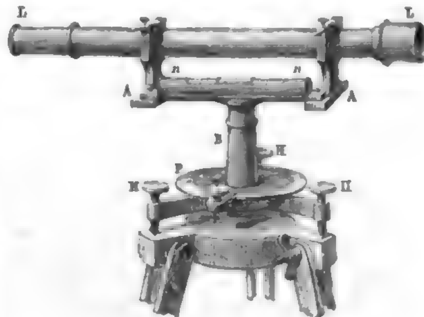


Fig. 96. — Niveau à lunette.

niveau est entre ses repères, la ligne de visée est horizontale, de sorte qu'il suffit d'opérer comme avec le niveau d'eau pour relever les différences de niveau de divers points; mais l'opération est ici beaucoup plus précise et la portée de l'instrument bien plus considérable. En munissant la plate-forme circulaire P sur laquelle se meut l'appareil de divisions, on peut assigner les azimuts des points observés et déterminer ainsi la ligne qui représente l'ensemble des points situés sur un même plan horizontal.

De part et d'autre des repères de la bulle se trouvent des divisions qui permettent de mesurer l'angle que fait une ligne avec

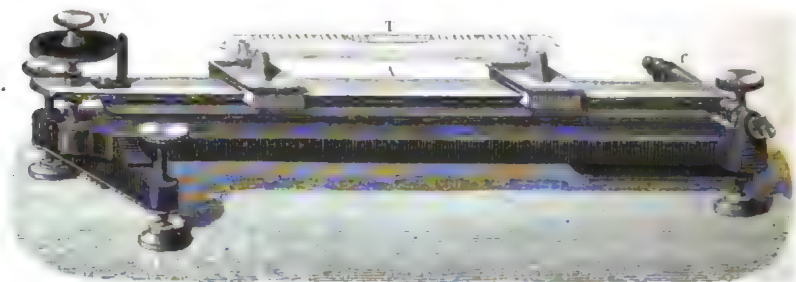


Fig. 97. — Appareil à régler les niveaux.

l'horizon. Il est aisé de voir, en effet, en se reportant à la fig. 93, que par le mouvement de la ligne sur laquelle repose le niveau, la bulle se déplace d'une quantité proportionnelle à cet angle lui-même, du moins lorsque la courbure de l'instrument est celle d'un cercle. Il suffit donc, pour pouvoir résoudre la question dont il s'agit, de déterminer préalablement la valeur angulaire qui correspond à une des divisions du tube. On se sert à cet effet d'une sorte de compas à charnière C (fig. 97) dont l'une des branches A peut recevoir sur des coussinets la fiole T du niveau. L'ouverture du compas se produit à l'aide d'une vis micrométrique V d'un pas très-régulier; et comme l'on connaît la distance de la charnière, à la pointe de la vis, les divers degrés de progression de celle-ci correspondent à des angles qu'il est très-facile de calculer à l'avance. Les vis calantes de l'instrument servent à amener la bulle entre ses repères, afin de ne se servir de la vis micrométrique que pour déterminer la valeur des divisions.

93. Équilibre de deux liquides différents dans des vases communicants. — Si dans deux tubes communicants on verse d'abord du mercure, ce liquide s'élèvera à la même hauteur dans les deux branches. Qu'on verse ensuite de l'eau dans l'une d'elles, le mercure sera refoulé dans l'autre branche, et lorsque l'équilibre sera établi, les hauteurs des deux liquides au-dessus de la surface de séparation seront très-inégales, comme le montre la figure. En général, ces hauteurs, correspondant à une même pression sur la surface de séparation, devront être inversement proportionnelles aux densités.



Fig. 98. — Équilibre de deux liquides différents dans des vases communicants.

94. Capillarité. — Phénomènes généraux. — Les diverses conditions d'équilibre qui ont été exposées dans tout ce qui précède souffrent des exceptions remarquables lorsque les liquides sont contenus dans des vases très-étroits, dits capillaires (*capillus*, cheveu), ou bien lorsque, quelle que soit la section du vase, on considère la portion du liquide qui est en contact immédiat avec les parois.

1° *Surface libre.* — L'horizontalité de la surface d'un liquide ne se vérifie qu'autant que l'on considère des points situés à une certaine distance des parois; au contact de ces parois elles-mêmes, le liquide présente une courbure très-prononcée. Lorsque le liquide mouille le vase, comme cela a lieu, par exemple, pour l'eau et le verre (fig. 99), la surface est concave vers l'extérieur; elle est convexe, au contraire, quand le liquide ne mouille pas, comme cela a lieu pour le mercure (fig. 100).

2° *Ascension et dépression capillaire.* — Si l'on plonge un tube de

verre très-étroit et ouvert à ses deux extrémités dans l'eau ou dans tout autre liquide capable de le mouiller (fig. 101), on voit que le niveau, au lieu de se montrer le même à l'extérieur et à l'intérieur,


Fig. 99.


Fig. 100.

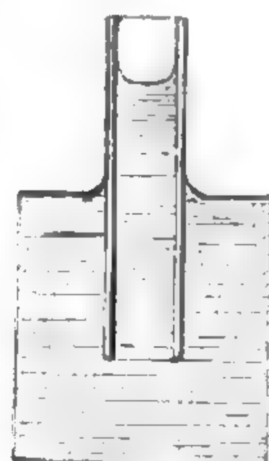
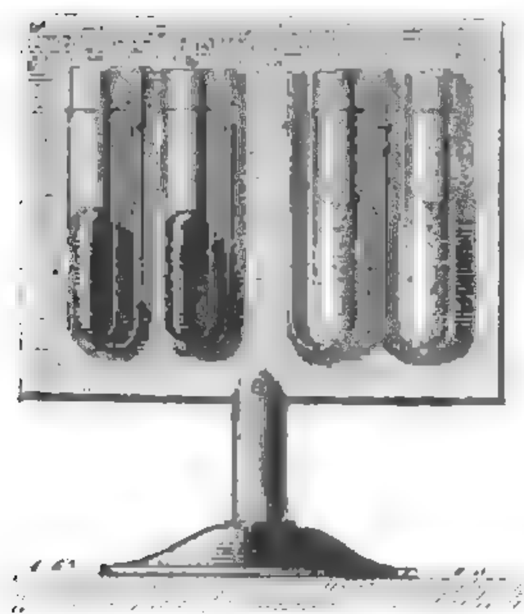

Fig. 101.


Fig. 102.

est très-notablement plus élevé dans le tube; il y a une *ascension capillaire*, variable d'ailleurs avec la nature du liquide et le diamètre du tube. On reconnaît en outre que la colonne liquide soulevée se termine par une surface courbe, concave vers l'extérieur. Si on plonge un tube de verre dans du mercure qui ne le mouille pas, on reconnaît, en approchant le tube de la paroi du vase, que le mercure est déprimé dans son intérieur et qu'il se termine par une surface courbe convexe vers l'extérieur (fig. 102).

3° *Vases communicants capillaires.* — Si dans des tubes communicants (fig. 103), dont une branche a un diamètre assez considérable, tandis que l'autre est très-étroite, on verse dans les uns différents liquides pouvant mouiller les tubes, dans les autres du mercure, on voit dans le premier cas le liquide atteindre un niveau plus élevé dans la branche capillaire, et un niveau plus bas dans le second; les surfaces terminales sont d'ailleurs concaves pour les liquides qui mouillent les tubes et convexes pour le mercure.


Fig. 103.

95. Circonstances qui influent sur l'ascension ou la dépression capillaire. — Dans les tubes mouillés, l'ascension dépend de la nature du liquide; ainsi à la température de 18°, l'eau s'élève dans

un tube de 1 millimètre de diamètre à 29^{mm},79, l'alcool à 12^{mm},18, l'acide nitrique à 22^{mm},57, l'essence de lavande à 4^{mm}, 28, etc. La nature du tube est à peu près sans influence, pourvu du moins que l'on ait la précaution de le mouiller préalablement avec le liquide sur lequel on expérimente, de telle sorte qu'il reste une sorte de gaine adhérente formée par le liquide lui-même.

Quand il s'agit des dépressions, celles-ci dépendent à la fois et de la nature du liquide et de la nature du tube. Dans tous les cas, l'ascension ou la dépression diminuent quand la température augmente.

Ainsi à zéro l'ascension de l'eau se trouvant égale à 132^{mm}, à 100° elle devient seulement égale à 106^{mm}. Il paraît même résulter des observations faites sur ce point qu'il y aurait pour chaque liquide une température à laquelle l'ascension deviendrait nulle. Ce résultat s'est produit dans quelques expériences de M. Wolf, qui ont donné lieu toutefois à certaines contestations.

96. Loi des diamètres. — La circonstance la plus importante à noter, c'est l'influence du diamètre des tubes. Gay-Lussac a le premier montré, par une série d'expériences exécutées avec beaucoup de soin, que *les ascensions et les dépressions capillaires sont, toutes choses égales d'ailleurs, inversement proportionnelles aux diamètres des tubes.* Comme cette loi se trouve être une conséquence des théories mathématiques (divergentes d'ailleurs en quelques points) que Laplace et Poisson ont données des phénomènes capillaires, on a attaché une très-grande importance à sa vérification.

MM. Wolf, Quet, Ed. Desains, etc., ont répété en les modifiant un peu les expériences de Gay-Lussac. La méthode consiste essentiellement à mesurer l'ascension capillaire d'un liquide en visant successivement avec la lunette *ll* d'un cathétomètre (fig. 104) le sommet *n* de la colonne dans le tube; et l'extrémité inférieure d'une pointe *b*, que l'on a fait affleurer à la surface du liquide extérieur, en un point où celle-ci est horizontale. Lorsqu'on veut observer la dépression du mercure, il faut, à cause de l'opacité du métal qui empêche de voir le tube, amener celui-ci tout contre la paroi du vase *e*.

Quant au diamètre du tube, on peut le mesurer directement

en observant sa section au microscope; ou bien encore, comme faisait Gay-Lussac, on pèse le mercure qui en occupe une certaine longueur l; le poids obtenu p est celui d'un cylindre de métal dont le rayon inconnu x se détermine par l'égalité $\pi x^2 l. 13,59 = p$.

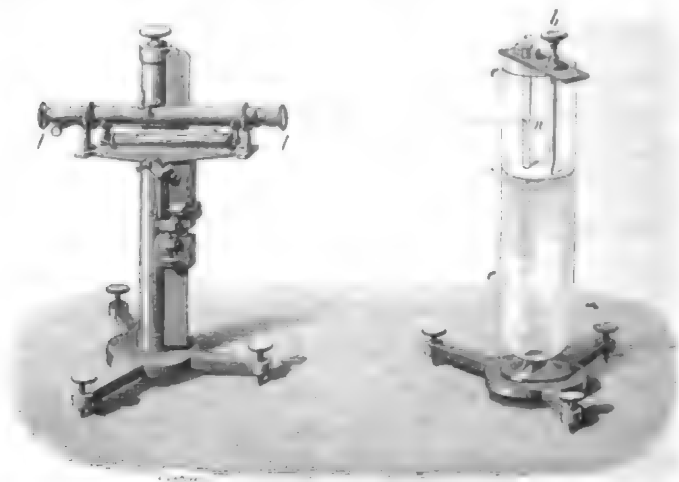


Fig. 104. — Vérification de la loi des diamètres.

Il résulte de ces diverses expériences que, dans le cas des tubes mouillés, pourvu qu'on ait la précaution de les laver avec le plus grand soin pour enlever les matières étrangères et d'y faire passer préalablement le liquide soumis à l'expérience, la loi de Gay-Lussac se vérifie très-exactement. Il n'en est pas de même lorsque le liquide ne mouille pas le tube; dans ce cas, des causes très-diverses peuvent faire varier la forme du ménisque qui termine la colonne liquide, et par suite la dépression qui est intimement liée à la courbure de la surface terminale. La connaissance du diamètre ne suffit donc pas dans ce cas pour qu'on puisse en déduire la dépression; il faut y ajouter un élément constitutif du ménisque, la grandeur de la flèche par exemple, ou la valeur de l'angle que font les derniers éléments de la surface courbe avec le tube, ce qu'on appelle l'*angle de raccordement*.

97. Cause des phénomènes capillaires. — Les phénomènes capillaires se produisant dans le vide aussi bien que dans l'air ne sauraient être attribués à l'action de l'atmosphère; toutes les cir-

constances que nous avons indiquées prouvent qu'ils dépendent des actions moléculaires qui se produisent soit entre les molécules du liquide lui-même, soit entre le liquide et le solide qui le contient. C'est sur cette idée fondamentale que repose la théorie mathématique de la capillarité de Laplace, dont les déductions se sont trouvées jusqu'à présent en parfait accord avec l'expérience [1].

La capillarité joue un rôle important dans plusieurs phénomènes naturels, et en particulier dans l'ascension de la séve des végétaux; on comprend en effet que si un tube de 1 millimètre de diamètre soutient l'eau à une hauteur de 30^{mm} environ, cette hauteur deviendrait égale à 9 ou 10 mètres pour un diamètre de 3 centièmes de millimètre, et ce degré de ténuité est tout à fait comparable à celui des vaisseaux qui se rencontrent dans les plantes. Les anciennes expériences de Boucherie sur l'injection des bois montrent que la séve peut entraîner avec elle les liquides qui sont mis en rapport avec les vaisseaux. Ainsi un tronc d'arbre coupé à son pied en pleine végétation, et plongé dans une cuve contenant un liquide, se trouve au bout de quelques jours injecté jusqu'à sa partie supérieure.

L'aspiration produite par les feuilles joue sans doute un rôle important dans ce curieux phénomène, puisqu'il ne réussit bien complétement que lorsqu'on en laisse au moins un bouquet à la partie supérieure; mais il n'est pas douteux non plus que la capillarité n'intervienne pour une part plus ou moins grande. Il est probable aussi que l'ascension se trouve favorisée par une particularité fort intéressante qui a été l'objet des recherches de M. Jamin. Lorsque dans un tube capillaire on laisse s'introduire de petites bulles d'air qui séparent les colonnes liquides, la force capillaire s'accroît dans une forte proportion. Un *chapelet* de ce genre peut maintenir de l'air fortement comprimé dans un réservoir, ou, ce qui est plus curieux encore, fermer complétement un récipient dans lequel on a fait le vide.

98. Endosmose. — Les phénomènes capillaires ont une ana-

1. Voir le Rapport sur les progrès du magnétisme, de l'électricité et de la capillarité, par M. Quet. Paris 1867, imprimerie impériale. — Librairie L. Hachette et Cie.

logie incontestable avec un fait fort important découvert par Dutrochet et auquel il a donné le nom d'*endosmose*.

L'*endosmomètre* qu'il a imaginé pour montrer ce phénomène se compose d'un réservoir *v* fermé inférieurement par une membrane *ba*, et présentant à la partie supérieure un tube d'une assez grande longueur. On place dans ce réservoir de l'eau gommée, par exemple, et on le maintient plongé dans l'eau. Au bout de quelque temps on voit que le niveau a monté dans le tube jusqu'en *n* par exemple, et on reconnaît d'ailleurs que l'eau du vase extérieur renferme de la gomme. On en conclut que les deux liquides ont traversé la membrane, mais en proportion différente; c'est en cela que consiste précisément le phénomène de l'endosmose.

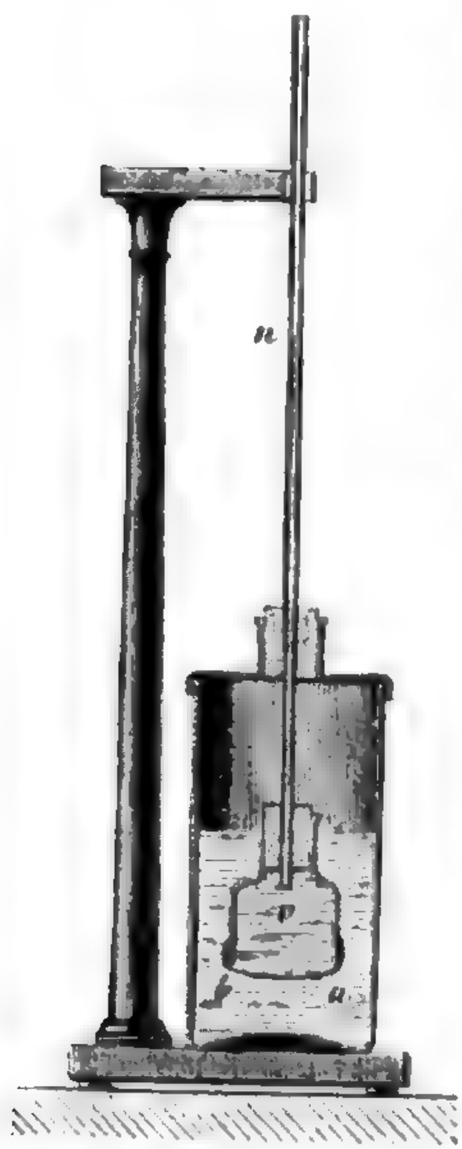


Fig. 105. — Endosmomètre.

L'expérience se produirait dans le même sens, sinon avec la même intensité, si à la place de l'eau gommée l'on employait des dissolutions sucrées, albumineuses ou gélatineuses. La cloison membraneuse peut être remplacée par une plaque de bois, d'argile ou de terre poreuse. Les physiologistes ont avec raison attaché une très-grande importance à la découverte de Dutrochet. On y trouve en effet l'explication de l'échange des liquides qui se fait continuellement dans les tissus et les vaisseaux de l'organisation, de l'absorption de l'eau par les spongioles des racines et de plusieurs phénomènes analogues.

La cause de l'endosmose est encore imparfaitement connue; nous nous bornerons à remarquer que l'action est surtout prononcée lorsque les liquides agissent chimiquement sur la cloison; or, comme toute action chimique donne lieu à la production d'un courant électrique, on comprend qu'on puisse rattacher les phénomènes dont il s'agit aux transports effectués par le courant. On expliquerait ainsi comment la chaleur, qui diminue l'intensité des actions capillaires, active au contraire les phénomènes d'endosmose.

CHAPITRE XII.

BAROMÈTRE.

99. Poids de l'air et des gaz. — Les corps gazeux possèdent un ensemble de propriétés qui leur sont communes avec les liquides; comme eux, ils transmettent intégralement et dans tous les sens les pressions conformément au principe de Pascal, mais ils en diffèrent surtout par la force répulsive permanente qui s'exerce entre leurs molécules. Cette expansibilité, en vertu de laquelle une masse de gaz tend à se dilater dans un volume de plus en plus grand, a pu sembler au premier abord en contradiction avec la loi de la pesanteur qui attire tous les corps vers la surface du sol. Aussi l'opinion que l'air n'est pas pesant a-t-elle prévalu pendant longtemps; ou, pour parler plus exactement, il n'est venu à l'esprit d'aucun des savants qui ont précédé Galilée d'attribuer un rôle quelconque dans les phénomènes naturels au poids de l'air atmosphérique. Or, comme ce rôle est capital, qu'il y a lieu d'en tenir compte dans la plupart des phénomènes physiques et surtout dans ceux qui sont le plus anciennement connus, il en est résulté que la découverte de la pesanteur de l'air a déterminé dans la physique, qui n'existait guère que de nom, une sorte de renaissance, point de départ de progrès successifs qui n'ont subi, jusqu'à l'époque actuelle, aucune interruption.

Il paraît toutefois qu'Aristote avait songé à la possibilité de la pesanteur de l'air, et pour s'en convaincre il pesait une outre successivement gonflée et dégonflée. Ayant obtenu le même poids dans les deux circonstances, il renonça à l'idée conçue un instant dans

son esprit. L'expérience telle qu'il l'exécutait ne pouvait avoir d'ailleurs qu'un résultat négatif. En effet, si le poids de l'outre augmentait d'une part par l'introduction d'une nouvelle quantité d'air, elle diminuait de l'autre d'une quantité équivalente, par suite de l'augmentation correspondante de la poussée de l'air déplacé. Pour pouvoir tirer une conclusion certaine, il faudrait opérer avec un vase qui, conservant le même volume extérieur, pourrait recevoir à l'intérieur de l'air dans différents états.

On attribue à Galilée une expérience consistant à peser successivement un ballon plein d'air ordinaire et d'air comprimé; le poids s'étant trouvé supérieur dans le second cas, Galilée en aurait déduit que l'air est pesant. Il ne paraît pas toutefois que l'importance de cette conclusion l'ait beaucoup frappé, car il ne lui a donné aucun des développements qui devaient pourtant se présenter si naturellement à un esprit comme le sien.

100. Expérience d'Otto de Guéricke. — Otto de Guéricke, l'illustre inventeur de la machine pneumatique, exécuta en 1650 l'expérience suivante, qui est décisive :



Fig. 100. — Poids de l'air.

On fait le vide dans un ballon en verre muni d'un robinet et d'une assez grande capacité (une douzaine de litres environ), on le suspend dans cet état à l'un des plateaux d'une balance, et on met dans l'autre plateau une tare convenable pour établir l'équilibre. On ouvre alors le robinet, l'air s'introduit dans le ballon, et on voit le fléau s'incliner graduellement du côté de celui-ci. Pour rétablir l'équilibre, il faut ajouter dans l'autre plateau des poids. Si la capacité est de 12 litres, il faudra environ $15^{gr},5$, ce qui donne approximativement pour le poids du litre d'air $1^{gr},3$.

En prenant pour exécuter cette expérience des précautions

particulières pour en assurer la précision, qui seront exposées dans le livre de la chaleur, on trouve qu'à la température de zéro et sous la pression de 760 millimètres, un litre d'air sec pèse $1^{gr},293$. Dans cet état, le rapport du poids de l'air à celui de l'eau sous le même volume est égal à $\frac{1,293}{1000} = \frac{1}{772}$. L'air pèse donc 772 fois moins que l'eau.

En répétant cette expérience avec d'autres gaz, on peut déterminer le poids de ceux-ci par rapport à l'air et le poids absolu d'un litre de chacun d'eux. C'est ainsi qu'on trouve que 1 litre d'oxygène pèse $1^{gr},43$, 1 litre d'acide carbonique $1^{gr},94$, 1 litre d'hydrogène $0^{gr},087$, etc.

101. Pression atmosphérique. — L'air atmosphérique forme autour de la terre une couche qui paraît s'élever jusqu'à 15 ou 20 lieues; cette masse fluide pesante exerce sur la surface de tous les corps des pressions tout à fait analogues, et par leur origine et par leur nature, à celles que subit un corps plongé dans l'intérieur d'un liquide. Elles sont soumises en particulier à la loi fondamentale indiquée au § 64. A partir de la surface du sol, la pression doit diminuer à mesure qu'on s'élève, mais elle doit conserver la même valeur dans les différents points d'une couche horizontale. A raison de la grande compressibilité du gaz, les couches inférieures sont beaucoup plus denses que les couches supérieures; mais la densité, comme la pression, conserve une valeur constante dans une même couche de niveau.



Fig. 107.—Pression atmosphérique.

On peut mettre en évidence la pression atmosphérique par une expérience fort simple : On remplit exactement d'eau un verre, et on applique à la partie supérieure une feuille de papier (fig. 107); on peut alors renverser le vase sans que le liquide tombe, ce qu'il faut attribuer à la pression normale que l'atmosphère exerce sur la feuille de papier. Le rôle de la feuille de papier est d'empêcher le mouvement individuel des molécules liquides, qui sans elle obéiraient séparément à l'action de la pesanteur, en même temps que l'air s'in-

troduirait dans le vase. Toutefois, si l'ouverture était suffisamment petite, l'adhérence du liquide contre les parois produirait le même effet et la feuille deviendrait inutile. C'est ainsi, par exemple, que bien que l'on pratique une petite ouverture dans un tonneau plein, le liquide ne s'écoule pas et il faut, pour que l'écoulement ait lieu, *donner de l'air* à la partie supérieure par une seconde ouverture.

On pourrait répéter l'expérience précédente avec des vases de hauteurs successivement croissantes et essayer de mesurer ainsi l'intensité de la pression atmosphérique ; mais ce serait là un procédé grossier. On doit à Torricelli une expérience qui met en pleine évidence la pression atmosphérique et permet d'en mesurer l'intensité avec une très-grande exactitude. Cette expérience, faite en 1643, un an après la mort de Galilée, à une époque où le poids et la pression de l'air étaient à peine soupçonnés, a immortalisé le nom de son auteur et exercé sur les progrès de la physique l'influence la plus considérable.

102. Expérience de Torricelli. — On prend un tube de verre de 6 à 8 millimètres de diamètre et de 80 centimètres de longueur environ (fig. 108), on le remplit entièrement de mercure, et après avoir bouché son extrémité avec le doigt, on le renverse sur une cuvette contenant le même métal. Si on ôte alors le doigt, on voit le mercure descendre dans le tube et s'arrêter à une hauteur un peu variable, suivant les circonstances, mais qui dans nos contrées est moyennement égale à 76 centimètres.

La portion du tube située au-dessus de la colonne de mercure étant vide de toute matière pondérable, il est clair que la suspension du liquide doit être attribuée à la pression atmosphérique qui s'exerce sur la surface de la cuvette. On peut préciser davantage cette explication en remarquant que les différents points de la surface horizontale ABCD (fig. 109) supportent une même pression ; la portion BC est donc pressée par la colonne de mercure comme elle le serait par l'air : on conclut par conséquent de l'expérience de Torricelli qu'*une surface quelconque éprouve, de la part de l'air, une pression normale qui est moyennement égale au poids d'une colonne de mercure ayant cette surface pour base et pour hauteur 76 centimètres.*

Il est clair que si l'on faisait une expérience analogue avec de

l'eau, dont la densité est 13,59 fois plus petite que celle du mercure, la hauteur de la colonne soulevée serait 13,59 fois plus grande, c'est-à-dire égale à $0^m,76 \times 13,59 = 10^m,33$, ou en anciennes mesures



Fig. 108. — Expérience de Torricelli.

32 pieds environ. C'est précisément la hauteur maxima à laquelle l'eau peut être poussée dans une pompe, ainsi que le reconnut Galilée. En général les hauteurs des différents liquides, faisant équilibre à la pression atmosphérique, doivent être inversement proportionnelles à leurs densités.

103. Pression d'une atmosphère. — On peut évaluer la valeur de cette pression pour une surface donnée, 1 centimètre carré par exemple. C'est le poids d'une colonne de mercure de 1 centimètre carré de base et de 76 centimètres de hauteur, c'est-à-dire le poids de 76 centimètres cubes de mercure. Or 1 centimètre cube

de mercure pesant $13^{gr},59$, le poids de 76 centimètres cubes est égal à $13^{gr},59 \times 76 = 1^{k},033$. Cette pression de 1 kilogramme environ par centimètre carré est ce qu'on appelle la pression de *une atmosphère;* elle s'exerce normalement sur tous les points de la surface d'un corps, et, par suite, de même que cela a lieu pour un corps plongé dans un liquide, la résultante des diverses pressions élémentaires est une poussée verticale dirigée de bas en haut et égale au poids de l'air déplacé. L'air n'a donc pas pour effet, comme on l'a cru quelquefois, d'appliquer les corps à la surface du sol, ceux-ci sont soulevés au contraire par lui, comme ils le sont par un liquide, avec une force qui est d'ailleurs peu considérable à cause de sa faible densité. C'est sur ce principe que sont fondés les aérostats, dont il sera question plus loin.



Fig. 100.

104. Expériences de Pascal. — On a supposé, sans qu'il y ait de cela des preuves bien décisives, que Torricelli aurait reçu de Galilée la notion précise de la pression atmosphérique [1]. Quoi qu'il en soit, lorsque l'expérience du savant italien fut connue en France, en 1644, personne n'était en mesure d'en donner l'interprétation véritable, et la célèbre doctrine de l'horreur de la nature pour le vide, par laquelle on expliquait l'ascension de l'eau dans les pompes, était généralement acceptée. C'est Pascal qui établit, d'une manière incontestable, la fausseté de cette vieille théorie, et parvint à faire prévaloir la doctrine rationnelle. Il proposa ou exécuta, dans ce but, une série

1. Les fontainiers du grand-duc de Toscane ayant eu besoin de pompes de 40 à 50 pieds, lorsqu'on les mit en jeu, on ne put jamais faire arriver l'eau à leur extrémité. Galilée s'étant assuré de la hauteur à laquelle elle s'arrêtait, la trouva d'environ trente-deux pieds, et ce philosophe, qui avait reconnu et démontré la pesanteur de l'air, put aisément penser que c'était le poids de la colonne atmosphérique qui faisait équilibre aux trente-deux pieds d'eau restés en suspension dans le corps des pompes. Cependant on ne pouvait guère espérer de cette idée des résultats bien utiles, lorsque plus tard Torricelli s'en empara et la féconda merveilleusement; voulant répéter l'expérience d'une manière plus commode, il imagina de substituer à l'eau un liquide quatorze fois plus pesant, le mercure, jugeant bien qu'une colonne quatorze fois plus courte ferait ainsi équilibre à cette force qui soutenait trente-deux pieds d'eau. (Biot, *Biographie universelle*, article Torricelli.)

d'expériences ingénieuses, il discuta minutieusement tous les faits que l'on attribuait à l'horreur du vide et montra qu'ils étaient une conséquence nécessaire de la pression de l'air.

Nous citerons particulièrement l'observation de Pascal, que le mercure se maintient à un niveau moindre à mesure qu'on s'élève. Cette belle et décisive expérience, que l'on répète chaque fois que l'on mesure les hauteurs par le baromètre, et qui ne laisse aucun doute sur la cause du phénomène, fut exécutée pour la première fois à Clermont et sur le sommet du Puy-de-Dôme, le 19 septembre 1648.

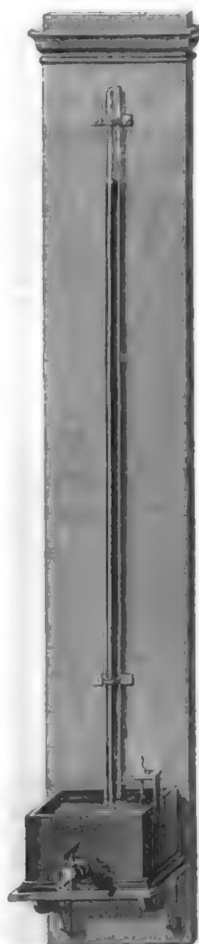


Fig. 110.
Baromètre normal.

105. Baromètre. — En installant d'une façon permanente le tube de Torricelli, on aura le moyen de mesurer, à chaque instant, la valeur de la pression atmosphérique, cette pression pouvant d'ailleurs être exprimée par la hauteur de la colonne de mercure qui lui fait équilibre; un pareil instrument se nomme un baromètre. Pour le construire on doit s'assujettir à certaines précautions indispensables. Il est essentiel d'opérer toujours avec un liquide parfaitement identique à lui-même, car la hauteur de la colonne soulevée dépend naturellement de la densité du liquide employé, et si celle-ci variait, les observations ne seraient point comparables entre elles.

On se sert de mercure chimiquement pur[1], et, après avoir rempli à peu près le tube barométrique, on le place sur un fourneau incliné et on porte le liquide à l'ébullition. Cette opération a pour objet de chasser l'air et l'humidité que peut contenir la colonne mercurielle, et qui, sans cette précaution, s'élèveraient successivement dans la chambre barométrique

1. On purifie ordinairement le mercure en le lavant avec un acide étendu et le soumettant ensuite à la distillation.

et donneraient lieu à une dépression qui ôterait toute exactitude aux pressions observées.

On achève de remplir le tube avec du mercure pur en ayant soin de n'introduire aucune bulle d'air, finalement on le renverse dans une cuvette contenant aussi du mercure pur et récemment bouilli, et on l'assujettit dans une position invariable, comme le montre la figure 110.

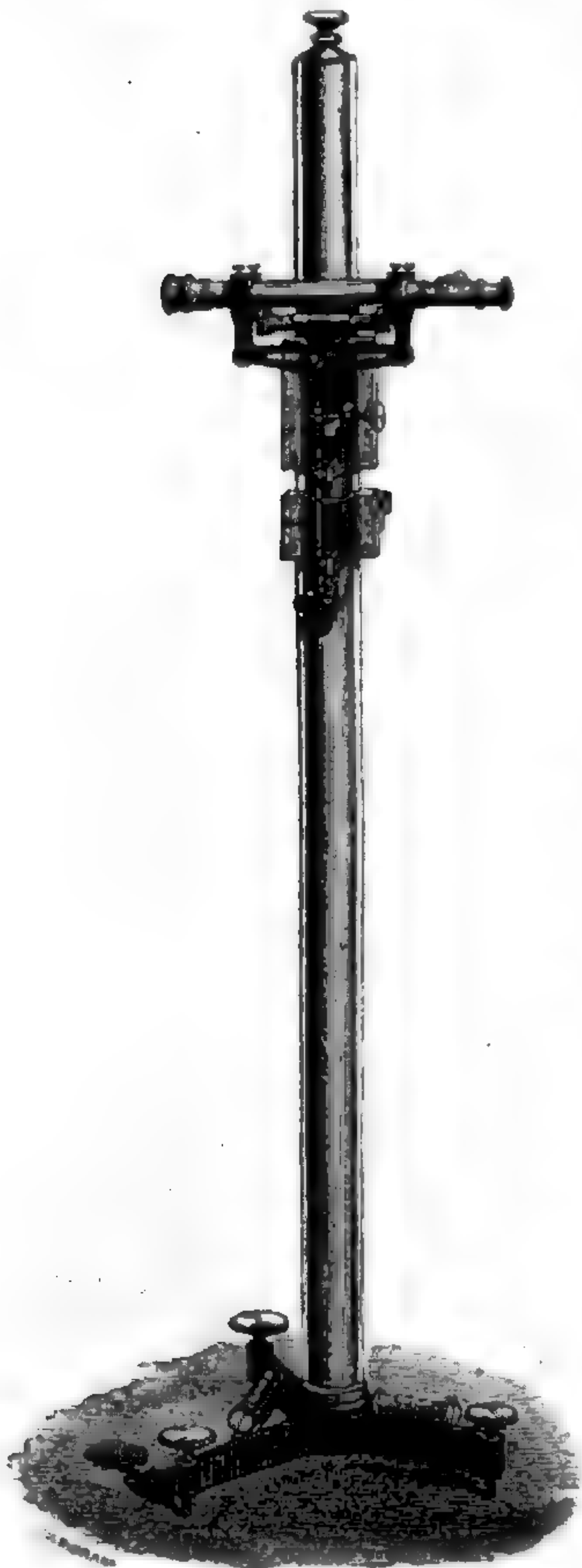


Fig. 111. — Cathétomètre.

On a ainsi un baromètre fixe; pour connaître à un moment quelconque la pression atmosphérique, il suffit de mesurer la hauteur du sommet de la colonne de mercure, au-dessus du niveau du liquide dans la cuvette. A cet effet on place au-dessus de cette dernière une tige en fer mobile dans un écrou et se terminant, à ses deux extrémités, par deux pointes déliées. On amène la pointe inférieure jusqu'au contact du mercure de la cuvette, et on mesure alors la distance de la pointe supérieure au sommet de la colonne de mercure; en ajoutant à cette distance la longueur de la tige qui a été déterminée une fois pour toutes, on a la hauteur barométrique. Cette mesure peut se faire très-exactement à l'aide du cathétomètre[1].

1. Le cathétomètre, dont on se sert si souvent en physique pour mesurer la distance verticale de deux points, a été imaginé par Dulong et Petit. Il se compose essentiellement (fig. 111) d'une règle verticale divisée ordinairement en demi-millimètres. Cette règle fait corps avec un cylindre en laiton pouvant tourner d'un mouvement très-doux autour d'un fort axe en acier. Celui-ci est fixé sur un pied à trois vis calantes, muni de deux niveaux à bulle d'air disposés en croix. Le long de la règle se meut un chariot

106. Baromètre de Fortin. — Le baromètre que nous venons de décrire est un baromètre fixe; lorsque l'instrument doit être transporté, on se sert du baromètre de Fortin, qui est d'ailleurs d'un usage tout à fait général. La cuvette (fig. 112), formée d'un tube en buis, et surmontée d'un tube de verre, est fermée inférieurement par une peau que l'on peut élever ou abaisser à l'aide d'une vis. Cette vis passe à travers un écrou pratiqué dans une garniture de cuivre qui enveloppe la partie supérieure et inférieure de la cuvette, en laissant en évidence la partie moyenne, pour qu'on puisse apercevoir le niveau du mercure. Le tube barométrique est enfermé dans une enveloppe de cuivre évidée de deux côtés opposés, sur laquelle se trouve gravée la graduation dont l'origine est à l'extrémité inférieure d'une pointe d'acier ou d'ivoire, fixée au couvercle de la cuvette. Un thermomètre, dont le réservoir est appliqué contre le tube, donne la température du mercure,

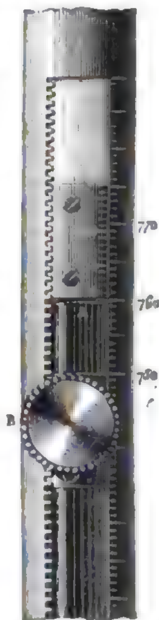
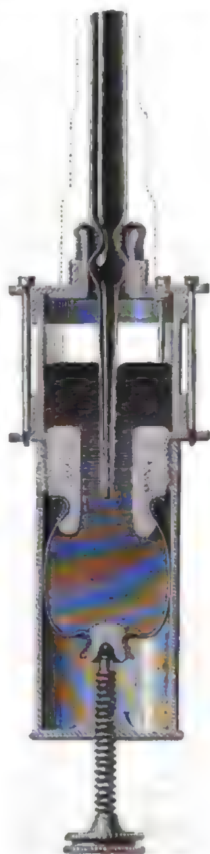


Fig. 113. Vernier du baromètre de Fortin.


Fig. 112. Cuvette du baromètre de Fortin.

portant une lunette munie à son foyer d'un réticule, c'est-à-dire d'un système de fils très-fins croisés, dont le point d'intersection sert à définir la ligne de visée. A l'aide d'une vis de pression on peut arrêter le chariot à une position déterminée et l'y amener très-rigoureusement par le mouvement d'une vis micrométrique. La lunette est d'ailleurs munie d'un niveau à bulle et les deux pièces peuvent recevoir, à l'aide d'une vis, un mouvement commun de rotation autour d'un axe horizontal, de manière que la ligne de visée puisse être rectifiée. Lorsque l'appareil est réglé, la ligne de visée de la lunette est horizontale, et la règle divisée verticale. Si donc l'on veut mesurer la différence de niveau de deux points, il suffit de les viser successivement et de mesurer le chemin parcouru sur la règle; ce que l'on fait à l'aide d'un repère muni d'un vernier fixé au chariot.

température qu'il est nécessaire de connaître pour effectuer les corrections dont il sera parlé plus loin. Un curseur, muni d'un vernier[1], se meut sur le tube de cuivre à l'aide de la crémaillère B et permet d'apprécier la hauteur avec une grande précision; le zéro du vernier correspond au bord inférieur du curseur. La manière dont le tube barométrique est ajusté sur la cuvette mérite d'être notée. La garniture de cuivre présente au centre de sa partie supérieure une ouverture surmontée d'un petit tube de même métal. Celui-ci est doublé intérieurement d'un autre tube de buis. On fait pénétrer le tube barométrique à l'intérieur, et on l'assujettit avec une peau de chamois. Cela constitue une fermeture hermétique pour le mercure, mais non point pour l'air, qui, passant à travers les

1. Le vernier est un instrument d'un usage très-général qui sert à apprécier des fractions d'une unité de longueur tracée sur une règle divisée. Voici quel en est le principe. Supposons une règle divisée en millimètres et considérons une deuxième règle renfermant neuf millimètres divisés en dix parties égales. Supposons que l'on fasse

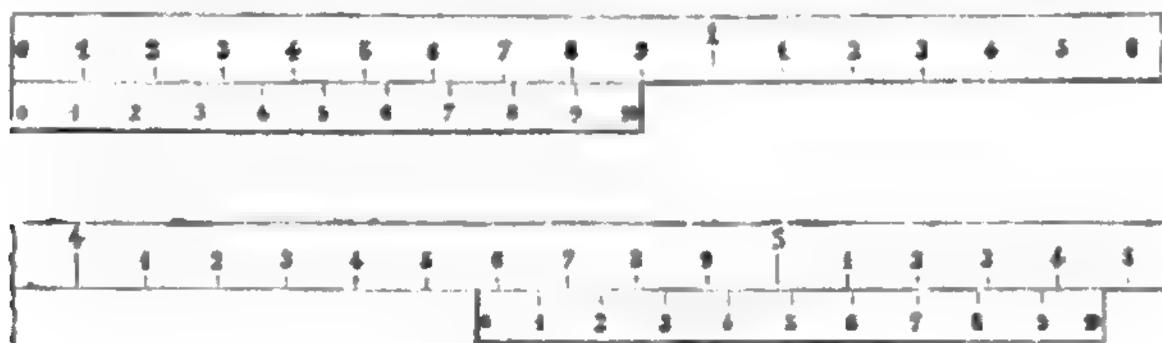


Fig. 114. — Vernier.

coïncider l'extrémité du vernier avec l'une des divisions de la règle; chacune des divisions du vernier ayant une longueur de 9/10 de millimètre, il est clair que le premier trait du vernier sera en avant du trait correspondant de la règle de 1/10 de millimètre, le second de 2/10, et ainsi de suite jusqu'au dixième, qui coïncidera exactement avec la neuvième de la règle. Supposons d'après cela qu'en mesurant une longueur on constate que son extrémité se trouve entre les n°s 5 et 6 de la règle; on place le vernier à la suite de la longueur à mesurer et on regarde quel est le trait du vernier qui coïncide avec un des traits de la règle, on voit sur la figure que c'est le septième, on en conclut que la fraction à évaluer est égale à 7/10 de millimètre.

Si l'on formait le vernier de dix-neuf millimètres divisés en vingt parties égales, on apprécierait le vingtième de millimètre; mais il y a une limite à la précision que l'on peut obtenir ainsi. En effet, la coïncidence exacte de deux traits du vernier et de la règle ne se rencontre jamais, on prend le trait pour lequel elle est le plus approchée, et lorsque la différence entre les traits du vernier et de la règle est très-petite, il peut y avoir dans cette appréciation une incertitude qui fasse plus que compenser la précision théorique de l'instrument. On se sert aussi du vernier dans les instruments à mesurer les angles; lorsque le cercle est divisé en demi-degrés, on emploie un vernier au trentième qui donne, par conséquent, le trentième d'un demi-degré ou une minute.

pores de la peau, pénètre dans la cuvette et transmet ainsi sa pression.

Lorsqu'on veut faire une observation, on amène, à l'aide de la vis inférieure, le niveau du mercure au contact de la pointe; on est assuré que cette condition est bien remplie quand l'extrémité de la pointe touche l'extrémité de son image dans le mercure. On fait alors glisser le curseur de façon que le plan horizontal qui contient le zéro soit tangent à la partie supérieure de la colonne de mercure, ce que l'on reconnaît aisément, car à ce moment on cesse d'apercevoir le jour entre le métal et le bord du vernier.

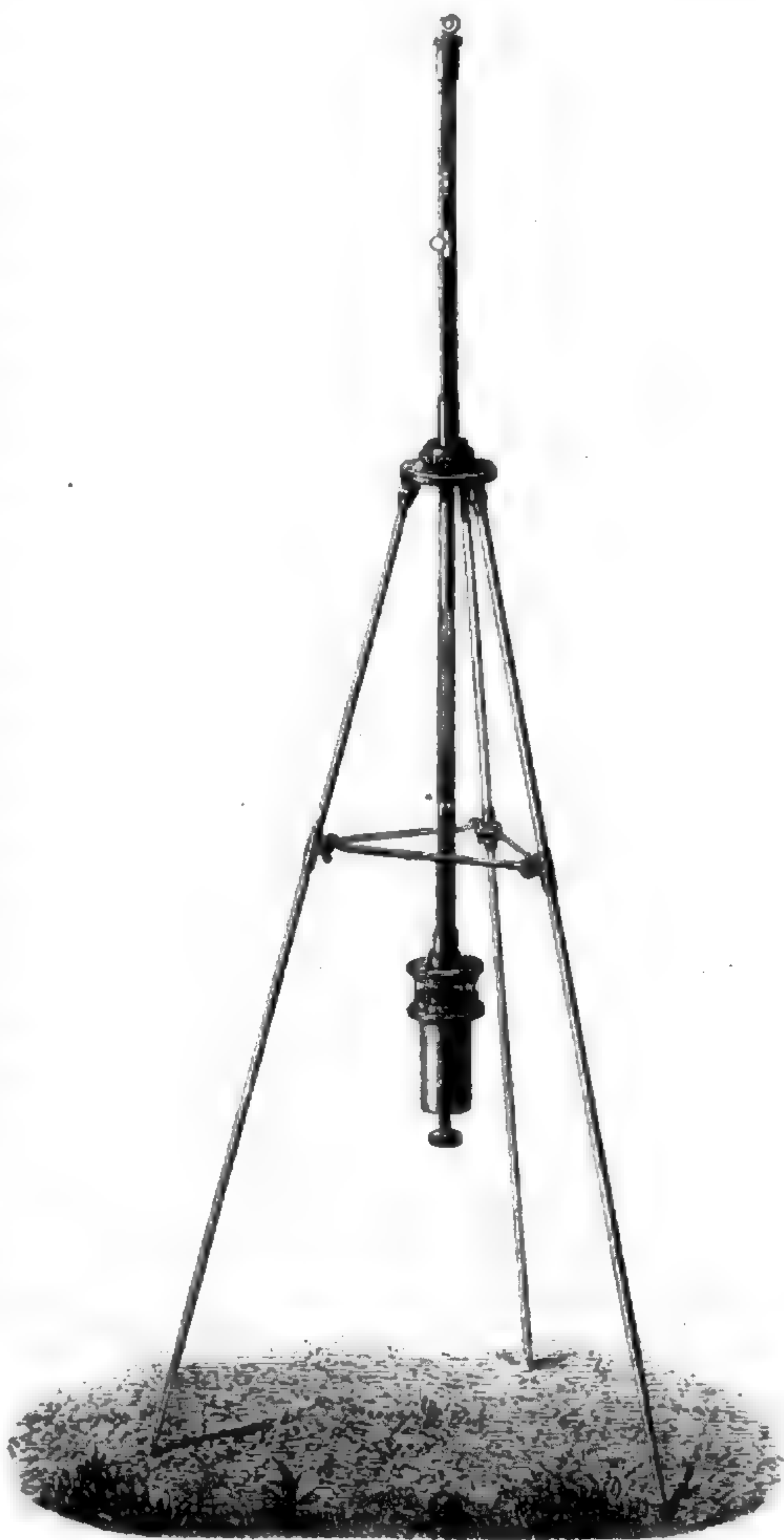


Fig. 115. — Baromètre de Fortin.

Quand on veut transporter l'instrument, on soulève la vis de manière à remplir le tube, la cuvette se trouve pleine aussi à ce moment; on peut alors renverser le baromètre, ce qui rend plus difficile l'introduction de l'air, et le transporter très-facilement. Pour faire une observation sur le terrain, on suspend l'appareil à une sorte de trépied muni d'une suspension de Cardan (fig. 115), de façon qu'il se dispose toujours verticalement.

107. Corrections barométriques. — Pour que les hauteurs barométriques soient bien comparables entre elles et puissent être considérées comme la mesure proportionnelle des pressions, il faut leur appliquer quelques corrections indispensables.

1° Tous les corps se dilatant par la chaleur, il s'ensuit que le mercure n'a pas la même densité aux diverses températures; il convient, d'après cela, de ramener toujours la hauteur à ce qu'elle serait si le mercure était à 0. Soit h la hauteur observée à la température t, h_0 la hauteur corrigée, d et d_0 les densités aux températures zéro et t. La pression correspondante à la hauteur observée, rapportée à l'unité de surface, est exprimée par hd ou par $h_0 d_0$; on a donc $hd = h_0 d_0$ ou $\frac{h_0}{h} = \frac{d}{d_0}$. Mais on verra plus loin (chap. XX) que $\frac{d}{d_0} = \frac{1}{1 + mt}$, m désignant le coefficient de dilatation du mercure qui est égal à $\frac{1}{5550}$, on en déduit

$$h_0 = \frac{h}{1 + \frac{t}{5550}} = h \frac{5550}{5550 + t}.$$

La température a aussi pour effet de faire varier la grandeur des divisions des règles graduées qui servent à mesurer la hauteur barométrique. Si l'on suppose que c'est à zéro que les divisions aient leur valeur exacte, une hauteur h observée à la température t équivaut en réalité à $h(1 + l\,t)$, l désignant le coefficient de dilatation *linéaire* de la substance dont est formée la règle qui est ordinairement en laiton. Cette correction n'est pas, à proprement parler, une correction barométrique, elle s'applique à tous les cas où l'on se sert d'une règle divisée pour mesurer une longueur; ajoutons qu'elle est généralement un peu fictive, car il est bien rare que l'échelle soit faite dans des conditions telles qu'on puisse assigner la température exacte à laquelle les divisions ont leur valeur nominale. Ce n'est que par une comparaison minutieuse avec une règle étalon, que l'on pourrait préciser la valeur des divisions à une température déterminée, et par suite donner une base certaine à la correction, d'ailleurs très-petite, dont il s'agit ici.

2° Nous avons vu dans le chapitre précédent que le mercure

éprouve dans un tube de verre une dépression capillaire, d'où il suit que la hauteur barométrique observée est trop petite et qu'il faut y ajouter la valeur même de la dépression. Dans les baromètres fixes on peut sans inconvénient donner au tube une section assez grande pour que les effets de la capillarité soient insensibles : 1 diamètre de 28 à 30 millimètres suffit pour cela; mais dans le baromètre de Fortin, où le diamètre du tube ne dépasse pas 5 ou 6 millimètres, la correction est nécessaire. On l'effectuait autrefois à l'aide de tables dressées par Bouvard, qui donnaient la valeur de la dépression correspondante aux divers diamètres du tube; on a reconnu depuis que ce procédé est insuffisant. On sait, en effet, que dans le cas où le tube n'est pas mouillé, le ménisque supérieur peut changer notablement de forme. Il faut donc, pour déterminer la valeur exacte de la dépression, joindre au diamètre du tube l'un des éléments constitutifs du ménisque, par exemple la hauteur de la flèche. On se sert à cet effet de tables à double entrée dont nous donnons ici un extrait, qui a d'ailleurs l'avantage de constater ce fait important que la dépression n'a pas la même valeur dans des tubes de même diamètre.

TABLE DES DÉPRESSIONS CAPILLAIRES.

RAYONS DU TUBE EN MILLIMÈTRES.	HAUTEUR DE LA FLÈCHE.								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
2	0,60	0,89	1,16	1,41	1,65	1,86	2,05	2,21	2,35
2,4	0,40	0,60	0,79	0,97	1,14	1,29	1,44	1,57	1,68
2,8	0,29	0,43	0,56	0,69	0,82	0,93	1,04	1,14	1,24
3	0,24	0,36	0,48	0,59	0,70	0,80	0,90	0,99	1,07
3,4	0,18	0,27	0,36	0,44	0,52	0,60	0,68	0,75	0,91
3,8	0,14	0,21	0,27	0,34	0,40	0,46	0,52	0,57	0,62
4	0,12	0,18	0,24	0,30	0,35	0,40	0,46	0,50	0,55
4,4	0,09	0,14	0,19	0,23	0,27	0,32	0,36	0,40	0,45
4,8	0,07	0,11	0,15	0,18	0,22	0,25	0,28	0,31	0,34
5	0,07	0,10	0,13	0,16	0,19	0,22	0,24	0,28	0,31

3° Lorsqu'on veut comparer les hauteurs barométriques dans

un même lieu, les deux corrections précédentes suffisent; mais lorsque les hauteurs ont été observées dans des lieux différents, il convient de tenir compte de la variation de la pesanteur. En effet, la pression atmosphérique est équilibrée par le poids d'une colonne de mercure et, à hauteur égale, ce poids n'est pas le même quand on passe d'une localité à une autre. Il est clair que les hauteurs qui font équilibre à une même pression sont inversement proportionnelles aux intensités de la pesanteur. Si donc on a observé une hauteur h dans un lieu où l'intensité de la pesanteur est g, pour ramener cette hauteur à ce qu'elle serait dans un lieu où cette intensité est G, il suffit d'écrire

$$\frac{g}{G} = \frac{x}{h}, \quad \text{d'où} \quad x = h \cdot \frac{g}{G}.$$

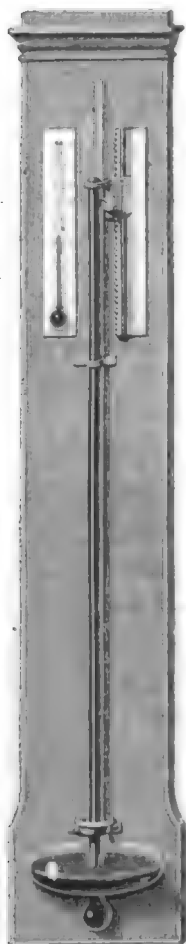


Fig. 116.
Baromètre à cuvette.

108. Baromètres ordinaires. — Les deux baromètres précédemment décrits sont des instruments destinés à des observations précises. On construit pour les usages ordinaires des instruments d'une exécution généralement moins soignée, que nous allons décrire sommairement.

Baromètre à cuvette. — Le baromètre à cuvette ordinaire (fig. 116) se compose d'un tube plongeant dans une cuvette, d'une forme en général semblable à celle que montre la figure. A côté du tube est disposée une échelle divisée dont l'origine est au niveau moyen du mercure dans la cuvette. De cette disposition résulte nécessairement que le zéro de la division sera tantôt hors du mercure, tantôt dans l'intérieur du liquide, car si le niveau du mercure varie dans le tube, il varie en sens inverse dans la cuvette; les hauteurs observées seront donc affectées d'une erreur dans un sens ou dans un autre. On rend ces erreurs très-petites et à peu près négligeables en donnant à la cuvette une section assez grande par rapport à celle du tube; de cette façon les variations du niveau y sont très-peu sensibles.

Baromètre à siphon. — Le baromètre à siphon (fig. 117) est formé d'un tube recourbé dont la petite branche s'ouvre dans l'air, la longue branche étant fermée. On commence par faire passer le mercure dans cette dernière de façon à la remplir, puis on redresse l'instrument de telle sorte que l'air ne puisse pas s'introduire dans la longue branche. La pression atmosphérique est alors mesurée par la différence de niveau du mercure dans les deux branches. On applique le tube sur une échelle, dont le zéro est au niveau moyen du métal dans la petite branche, que l'on élargit assez pour que les variations de niveau y soient insensibles.

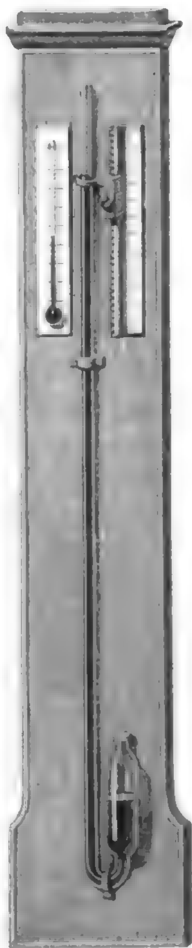


Fig. 117.

Baromètre à cadran. — Le baromètre à cadran (fig. 118), très-répandu dans les appartements, est formé d'un baromètre à siphon dont les deux branches ont le même diamètre. Sur le mercure de la branche ouverte flotte un petit morceau de fer suspendu à un fil qui vient se fixer par son autre extrémité et s'enrouler en partie sur la gorge d'une poulie; un autre fil, enroulé parallèlement au premier, supporte un poids qui fait équilibre au flotteur. A l'axe de la poulie est fixée une aiguille qui se meut sur un cadran. Lorsque le niveau du mercure varie dans un sens ou dans un autre, le flotteur suit son mouvement et s'enfonce toujours de la même quantité; par l'action du contre-poids la poulie tourne et entraîne l'aiguille dont l'extrémité s'arrête devant les points du cadran, où se trouve inscrite la hauteur barométrique correspondante. La monture du cadran est disposée en général au-devant du tube, de façon à en dissimuler la présence. Le baromètre à cadran est d'invention fort ancienne, il a été imaginé par le célèbre Hoock, en 1683; on l'a quelque peu perfectionné depuis, en remplaçant la poulie par une petite roue dentée qui engrène avec une crémaillère fixée verticalement au flotteur. Le défaut de ces appa-

reils est d'offrir un peu d'inertie à cause du frottement des organes accessoires ajoutés au baromètre ordinaire ; aussi convient-il, lorsqu'on veut observer, de faciliter le mouvement de l'aiguille par

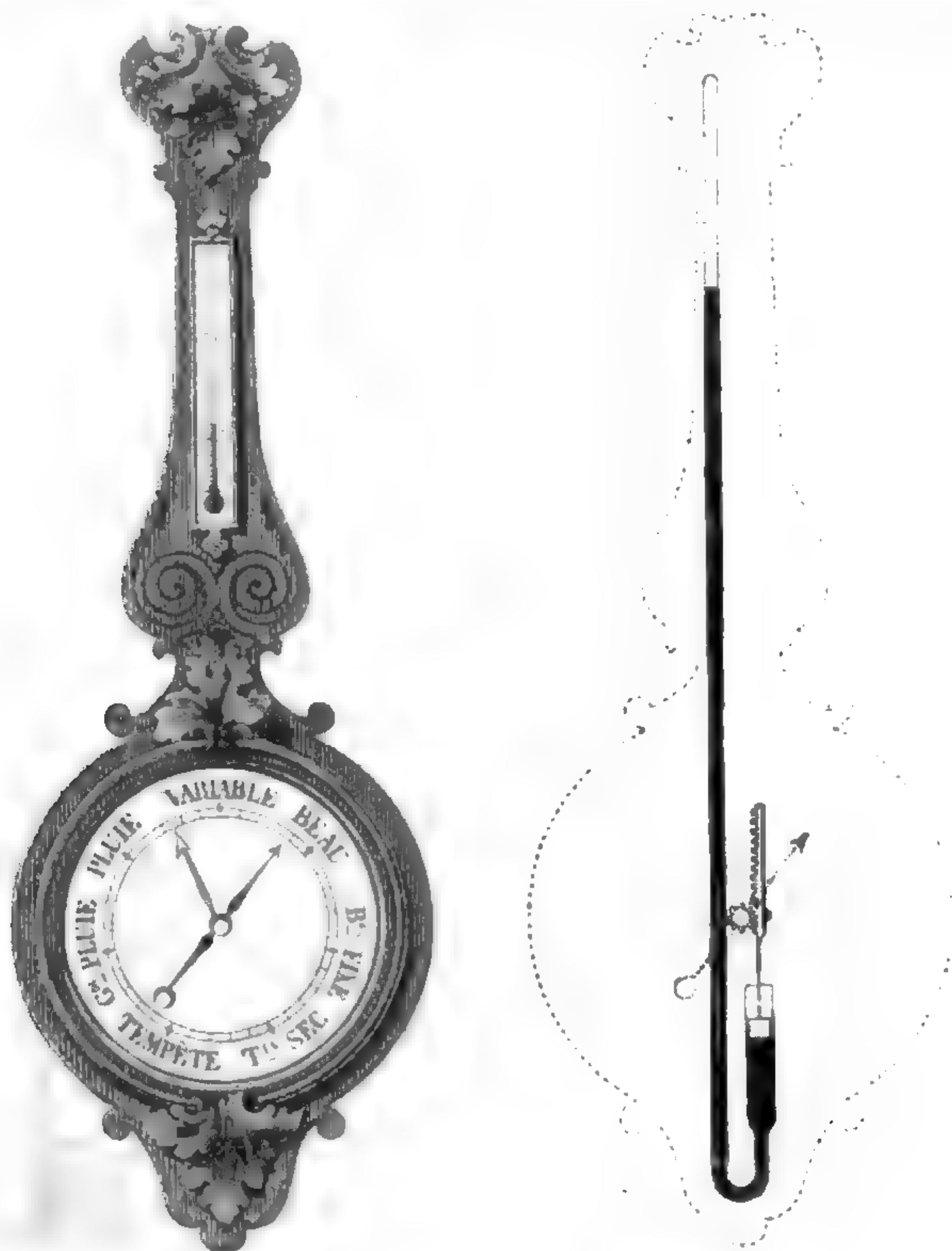


Fig. 118. — Baromètre à cadran.

quelques petits chocs donnés sur le cadran. Ils ont l'avantage de donner des indications plus apparentes; la course de l'extrémité de l'aiguille est en effet beaucoup plus grande que celle du mercure, dans le rapport même de la longueur de l'aiguille au rayon de la poulie ou de la roue dentée.

109. Baromètres métalliques ou anéroïdes. — Les baromètres métalliques sont fondés sur le changement de forme qu'éprouve un vase en métal, à parois très-minces, dans lequel on a fait le vide, quand la pression atmosphérique vient à varier. M. Vidie a le premier, à la suite de persévérantes recherches, résolu les difficultés

nombreuses que présentait la construction de ces instruments. Nous donnons ici la figure du dernier modèle auquel il s'était arrêté.

L'organe essentiel est une boîte cylindrique dans laquelle on a fait le vide, et dont la surface supérieure est plissée, pour multiplier les points où s'exerce la pression extérieure ; au centre de la

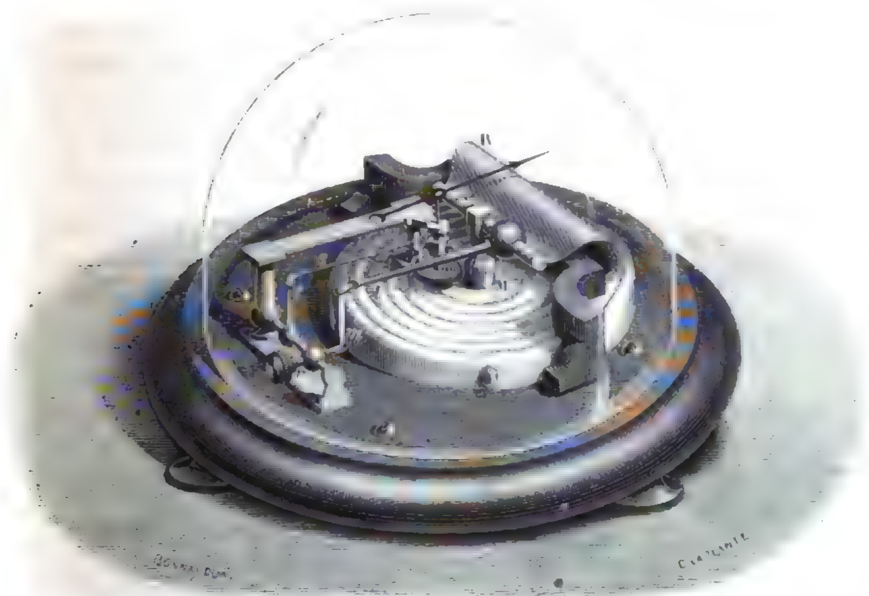


Fig. 119. — Baromètre de Vidie.

boîte s'élève un petit pilier métallique M, en relation avec le bout d'un très-fort ressort en acier R. La pression variant, le haut de la boîte s'élève ou s'abaisse, transmet son mouvement au ressort et de là, par le moyen de deux leviers *l* et *m*, à un axe métallique *r*. Ce dernier porte un troisième levier *t* dont l'extrémité est fixée à une chaîne *s* qui agit sur un treuil dont l'axe porte l'aiguille indicatrice. Un ressort spiral maintient la chaîne constamment tendue et assure par conséquent la position de l'aiguille qui correspond à la forme actuelle de la boîte. Le baromètre de Vidie joint à un grand degré de sensibilité une solidité de mécanisme bien entendue. Ce n'est pas la seule, mais c'est la première et actuellement la meilleure solution du problème des baromètres métalliques, celle qui

paraît présenter au moindre degré l'inconvénient capital de ce genre d'instruments, c'est-à-dire l'altération permanente dans la forme du vase vide, par suite du travail intérieur des molécules.

110. Baromètres divers. — Depuis l'époque de l'invention du baromètre, on a imaginé des dispositions très-diverses pour cet instrument, qu'il n'y a aucun intérêt à rappeler ici; nous en mentionnerons deux toutefois que l'on a tirées de l'oubli récemment en les appliquant à des usages spéciaux.

Baromètre balance. — L'invention de cet instrument est attribuée à Samuel Morland, qui le construisit vers l'année 1680. Il repose sur le principe suivant : Si l'on fixe la partie supérieure d'un tube barométrique au plateau d'une balance, il faudra pour faire équilibre placer dans l'autre plateau un poids égal au poids du tube et du mercure qu'il contient, diminué de la poussée du liquide. Que la pression atmosphérique vienne à augmenter, du mercure montera dans le tube, le poids du corps flottant augmentera par suite, et la poussée diminuant d'ailleurs un peu à cause de l'abaissement de niveau dans la cuvette, la balance s'inclinera du côté du tube barométrique; un phénomène inverse aurait lieu si la pression venait à diminuer. A la balance on peut substituer, comme le montre la figure, un levier muni d'un contre-poids; les variations de la pression seront indiquées par les mouvements mêmes du levier.

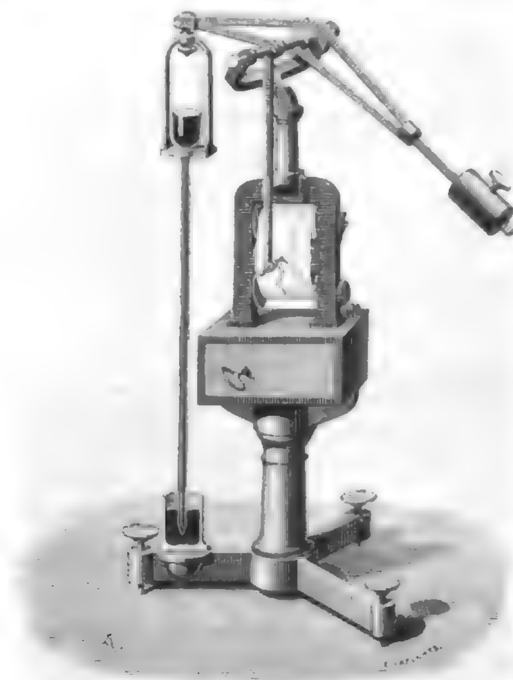


Fig. 120. — Baromètre balance.

Un pareil instrument est très-propre à servir de *baromètrographe* ou baromètre enregistreur. Il suffit, en effet, de disposer sur une pièce dépendant du levier un organe traceur qui s'appuie constamment sur une feuille de papier à laquelle une horloge imprime un déplacement uniforme, il en résultera un tracé graphique continu dont les diverses ondulations donnent tout d'abord l'idée de la marche générale des pressions. Il est très-facile d'ailleurs de savoir à quelle pression effective correspond une position donnée du crayon sur la feuille; si donc on a tracé sur celle-ci 24 lignes équidistantes correspondant aux 24 heures de jour, on saisira du premier coup d'œil la variation exacte des pressions aux divers moments de la journée. C'est une disposition de ce genre que le père Secchi a adoptée pour le météorographe de l'observatoire romain, dont un modèle fut très-remarqué à l'Exposition universelle de 1867.

Baromètre de Fahrenheit. — Le baromètre de Fahrenheit se compose d'un tube plusieurs fois recourbé, contenant du mercure dans les parties inférieures; les parties supérieures de l'appareil sont remplies d'eau ou de tout autre liquide coloré. Il est clair que la pression atmosphérique est équilibrée par la somme des différences de niveau de mercure diminuée de la somme correspondante aux colonnes d'eau; d'où il suit que si le nombre des tubes est un peu considérable, la hauteur du baromètre pourra être considérablement réduite. Si cette circonstance a donné quelque intérêt de curiosité à cet instrument, elle est aussi la cause de son peu de sensibilité et d'exactitude; aussi n'a-t-on pas songé à l'employer comme baromètre; mais on a récemment utilisé son principe pour mesurer une pression très-forte avec une petite hauteur de mercure, ainsi que cela sera expliqué au chapitre XIV.

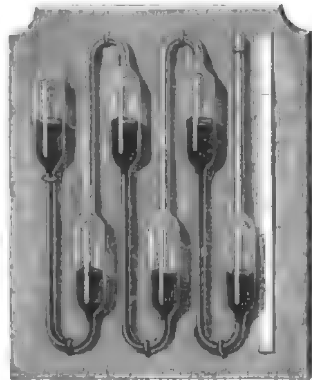


Fig. 121. — Baromètre de Fahrenheit.

CHAPITRE XIII.

VARIATIONS DU BAROMÈTRE

111. Mesure des hauteurs par le baromètre. — La hauteur du mercure dans le baromètre diminuant à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, il est naturel de chercher dans ce phénomène un moyen de mesurer les hauteurs. Le problème serait tout à fait simple si l'air avait partout la même densité qu'à la surface du sol. En effet, cette densité étant 10500 fois environ plus faible que celle du mercure, il s'ensuit, dans l'hypothèse d'une densité constante, que pour que le baromètre descendît de 1 centimètre, il faudrait s'élever dans l'atmosphère à une hauteur 10,500 fois plus forte, c'est-à-dire à 105 mètres. Ce résultat est tout à fait inexact, la densité de l'air diminuant très-rapidement avec la hauteur, par suite de l'extrême compressibilité de ce fluide.

On remarquera que si l'atmosphère avait une densité constante, la hauteur s'obtiendrait en multipliant $0^m,76$ par 10,500, ce qui donne 7,980 mètres; suivant les conjectures les plus plausibles, la hauteur de l'atmosphère est au moins dix fois plus grande.

En supposant que la température ne varie pas dans une colonne verticale d'air, il est facile de préciser la manière dont la pression varie à mesure qu'on s'élève. Considérons, par exemple, trois couches assez minces pour qu'on puisse considérer la densité comme constante dans toute l'étendue verticale de chacune d'elles. Soient D, D', D'' ces densités, P, P', P'' (fig. 122) les pressions qui règnent à la partie inférieure des couches; les poids des deux

couches inférieures ont pour valeur P — P′ et P′ — P″, et ces poids sont évidemment proportionnels aux densités; ce qui donne la relation

$$\frac{P - P'}{P' - P''} = \frac{D}{D'}.$$

Mais d'après la loi Mariotte, qui sera expliquée au chapitre suivant, les densités, dans chaque couche, sont proportionnelles à la pression correspondante ; on a donc

$$\frac{D}{D'} = \frac{P}{P'} \quad \text{et par suite} \quad \frac{P}{P'} = \frac{P - P'}{P' - P''},$$

d'où

$$\frac{P}{P'} = \frac{P'}{P''}.$$

Ce qui veut dire qu'il y a un rapport constant entre les pressions qui règnent dans les couches consécutives et équidistantes de l'air atmosphérique. On peut dire encore que *pour des hauteurs variant en progression arithmétique, les pressions varient en progression géométrique.*

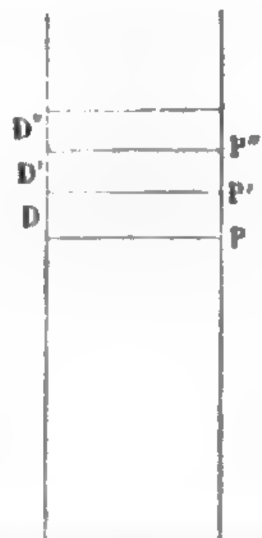


Fig. 122.

On peut exprimer algébriquement ce résultat en écrivant que la pression h qui règne à une hauteur z est égale à la pression H à la surface du sol divisée par un nombre constant élevé à la puissance z :

$$h = \frac{H}{a^z}, \quad \text{d'où} \quad a^z = \frac{H}{h} \quad \text{et} \quad z = \frac{1}{\log a} \log \frac{H}{h}.$$

Il suffira pour employer cette formule à la mesure des hauteurs de déterminer la valeur du coefficient $\frac{1}{\log a}$.

Cette formule suppose que la température et l'intensité de la pesanteur restent les mêmes dans toute l'étendue de la colonne verticale ; il n'en est point ainsi en réalité. On ignore du reste la loi suivant laquelle varient ces deux éléments, de sorte que pour rectifier la formule, on a recours à des méthodes un peu empiriques.

Quand la hauteur à mesurer ne dépasse pas 6000 mètres, on peut employer la formule suivante, qui porte le nom de formule de Laplace :

$$z = 18393^{m} (1 + 0{,}002837 \cos 2\lambda) \left(1 + \frac{2(t + t')}{1000}\right) \log \frac{H}{h}.$$

t et t' désignent les températures aux stations inférieure et supérieure et λ la latitude moyenne.

112. Application. — Appliquons la formule de Laplace à l'exemple suivant, emprunté à l'Annuaire du Bureau des longitudes ; c'est la mesure de la hauteur du Guanaxato par de Humboldt :

$$H = 763^{m}, \quad t = 25^{\circ},3, \quad \lambda = 21^{\circ} ;$$
$$h = 600{,}95, \quad t' = 21^{\circ},3.$$

De ces données on déduit :

$$\log \frac{H}{h} = 0{,}1037186 ; \quad 1 + \frac{2(t + t')}{1000} = 1{,}092 ; \quad 1 + 0{,}002837 \cos 2\lambda = 1{,}0005 ;$$

d'où

$$z = 18393^{m} . 0{,}1037186 . 1{,}092 . 1{,}0005 = 2084^{m},1.$$

Le calcul fait à l'aide de la formule plus compliquée qui se trouve dans l'Annuaire donne 2084,4.

Cherchons à l'aide de cette formule, en la supposant applicable dans ce cas, ce qui est fort douteux, à quelle hauteur il faudrait s'élever pour que la pression soit seulement de 1 millimètre de mercure. Admettons que le facteur $t + t'$ se réduise à zéro, la formule donne simplement

$$Z = 18393^{m} \times \log 760 = 18393 . 2{,}8808136 = 52986^{m} = 13 \text{ lieues environ.}$$

On peut considérer ce nombre comme une indication approximative de la hauteur de l'atmosphère.

113. Variations diurnes du baromètre. — Dans nos contrées la colonne mercurielle oscille d'une façon pour ainsi dire continuelle, suivant la direction du vent et le degré plus ou moins grand d'humidité de l'air atmosphérique. Ces variations irrégulières ont une amplitude très-considérable, qui peut s'élever jusqu'à 55 ou même 60 millimètres.

Il n'en est pas de même dans les régions tropicales, où la hauteur du baromètre est à peu près indépendante de l'état de l'atmosphère. Si dans ces contrées on observe avec attention la marche de l'instrument pendant une journée, on remarque qu'il se produit une oscillation d'une assez grande régularité.

En général le baromètre monte depuis quatre heures du matin jusque vers dix heures, moment où il atteint un premier maximum, puis il descend jusque vers quatre heures du soir à un premier minimum; à dix heures on observe un second maximum et un deuxième minimum à quatre heures du matin. Les heures des maxima et des minima se nomment heures tropiques, elles varient un peu avec la saison. On appelle amplitude de la variation diurne la différence entre le plus grand maximum et le plus petit minimum; elle ne dépasse pas deux ou trois millimètres.

Ces variations horaires sont rendues très-sensibles par la figure 123. Les lignes verticales représentent les vingt-quatre heures de la journée; on a porté sur elles des longueurs proportionnelles aux hauteurs barométriques, et on a réuni les extrémités par un trait continu. On voit que les courbes inférieures dont l'une se rapporte à Cumana, ville de Vénézuéla, située à 10° de latitude nord, présentent des ondulations correspondantes aux maxima et minima très-prononcées. Dans nos pays, la variation diurne est complétement masquée par les oscillations irrégulières, et il serait impossible de la constater dans le cours d'une journée; mais en prenant les pressions moyennes pendant un certain nombre de jours, on voit apparaître la loi; une durée d'un mois suffit pour cela, mais il faut un nombre considérable pour pouvoir assigner, avec un peu de précision, l'heure des maxima et l'amplitude de la variation.

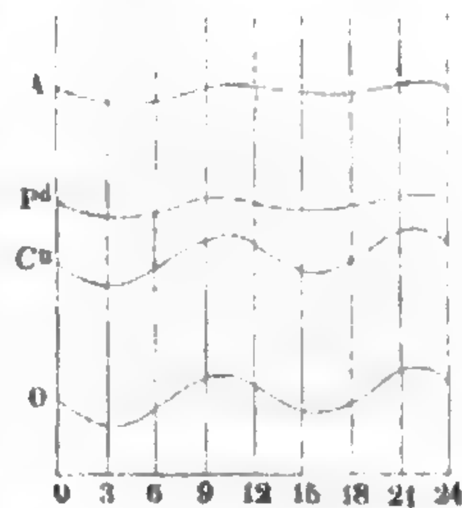


Fig. 123.

La même figure 123, dont les éléments sont empruntés au *Traité de météorologie* de Kaemtz, montre les courbes construites d'après l'observation du baromètre à Padoue (lat. 45° 24′) et Abo (lat. 60° 56′). On voit clairement, d'après leur inspection, que la variation est d'autant moins pro-

noncée que la latitude est plus élevée; l'amplitude à Abo est à peine de 2/10 de millimètre. Vers le 70e degré de latitude elle est tout à fait nulle; et si l'on s'approche davantage du pôle, il paraît, d'après quelques observations qui auraient besoin d'être confirmées, mais qui sont plausibles du reste, que la variation se produit en sens inverse, c'est-à-dire qu'à la place des minima on observe des maxima, et réciproquement.

Il existe en physique peu de phénomènes aussi obscurs dans leur origine que celui des variations horaires du baromètre. Le double maximum et le double minimum avaient naturellement fait penser à une action du soleil et de la lune, analogue à celle qui produit les marées; mais s'il en était ainsi, les heures tropiques devraient varier en même temps que l'heure du passage de la lune au méridien, et on n'observe rien de semblable. Il est incontestable que l'oscillation diurne du baromètre est liée à l'oscillation de la température, les mouvements du thermomètre et du baromètre étant dans un rapport très-étroit; mais il n'y a qu'un maximum et qu'un minimum de température, tandis qu'il y en a deux pour le baromètre, et c'est là qu'est la difficulté. Les propriétés physiques de la vapeur jouent peut-être un rôle dans le phénomène. En effet, lorsque la température s'élève, le baromètre tend à baisser par la dilatation de l'air, mais la force élastique de la vapeur d'eau, croissant rapidement avec la température, peut compenser d'une manière plus ou moins complète le premier effet. De même, dans le cas du refroidissement, l'élévation du baromètre, qui en est généralement la conséquence, peut être diminuée par la suppression d'une quantité plus ou moins notable de vapeur. Le phénomène observé est donc la résultante de deux autres dont chacun peut présenter un maximum et un minimum qui ne concordent pas. Ainsi, par exemple, quand le matin la pression de l'air diminue, avant qu'elle ait atteint son minimum propre, l'effet de la vapeur d'eau peut donner lieu à un accroissement qui modifie la marche du phénomène un instant, et par suite fasse naître un maximum de l'effet complexe.

114. Variations irrégulières du baromètre. — La hauteur du baromètre, dans les latitudes moyennes du moins, dépend de l'état

de l'atmosphère, et ses variations peuvent servir à prévoir, avec plus ou moins de certitude, les changements qui peuvent s'accomplir dans son sein. En général, le baromètre baisse par la pluie ou *le mauvais temps*, il monte au contraire quand le temps devient sec et beau.

C'est à cause de cette destination spéciale que le baromètre est devenu un instrument usuel et excessivement répandu. Afin de faciliter l'interprétation des résultats qu'il peut fournir à ce sujet, on a l'habitude de placer sur l'échelle, à côté des nombres qui mesurent la hauteur de la colonne de mercure, les indications suivantes :

785^{mm}.	Très-sec.
776 —	Beau fixe.
767 —	Beau.
758 —	Variable.
749 —	Pluie ou Vent.
740 —	Grande pluie.
731 —	Tempête.

Ces indications ne sauraient avoir rien d'absolu, et surtout présenter un caractère individuel de certitude ; mais leur sens général est tout à fait conforme à l'observation. Cela résulte très-clairement de la comparaison des pressions observées pendant un certain nombre d'années. Ainsi à Paris (et partout on pourrait faire des remarques analogues), la valeur moyenne de toutes les pressions observées depuis environ un demi-siècle est de 755^{mm},7 ; la moyenne des pressions observées les jours de pluie est de 749^{mm},8, et la moyenne des pressions observées les jours de beau temps est de 760^{mm},5. De là on conclut, comme un fait incontestable, que la pression est moyennement moindre par la pluie que par le beau temps. Il est naturel, d'après cela, de prévoir le beau temps lorsque le baromètre monte, et la pluie quand il baisse ; mais on comprend que cette prévision puisse être en défaut, car les nombres précédents sont des nombres moyens, et ils résultent par conséquent de la combinaison d'éléments dont quelques-uns peuvent avoir un sens différent de celui du résultat général.

115. Marche inverse du baromètre et du thermomètre. — On

ne saurait donner une théorie générale du rapport qui existe entre les indications du baromètre et l'état de l'atmosphère, puisqu'on ne l'observe pas partout, à beaucoup près, au même degré. Toutefois on peut en donner une explication qui s'applique à un assez grand nombre de cas. En effet, les vents chauds, surtout s'ils ont passé au-dessus de masses d'eau un peu considérables, doivent être fréquemment accompagnés de pluie, car ils apportent de la vapeur d'eau qui éprouve un abaissement de température et tend par conséquent plus ou moins à se condenser.

Les vents froids, au contraire, apportent de la vapeur qui, dans des couches d'une température plus élevée, s'éloigne naturellement de son point de saturation. Ils doivent donc être secs, du moins dès qu'ils règnent depuis un peu de temps, leur premier résultat pouvant être de condenser la vapeur d'eau déjà formée, et de donner lieu à des nuages ou même à de la pluie. Ces particularités sont surtout marquées dans nos pays, où les vents chauds du sud et du sud-ouest passent au-dessus de l'Atlantique, tandis que les vents froids du nord et surtout du nord-est ne rencontrent pas dans leur marche de grandes masses liquides. D'autre part, la marche du baromètre est, en général, inverse de celle du thermomètre. *Quand le thermomètre monte, le baromètre baisse, et vice versa.* Cette loi est une des plus générales de la météorologie, elle s'explique d'ailleurs aisément; en effet, quand la température s'élève quelque part, il en résulte une dilatation de l'air et par suite un écoulement de ce fluide dans les régions voisines; la pression doit donc diminuer. Au contraire, un refroidissement détermine un appel d'air qui provoque naturellement un accroissement de pression.

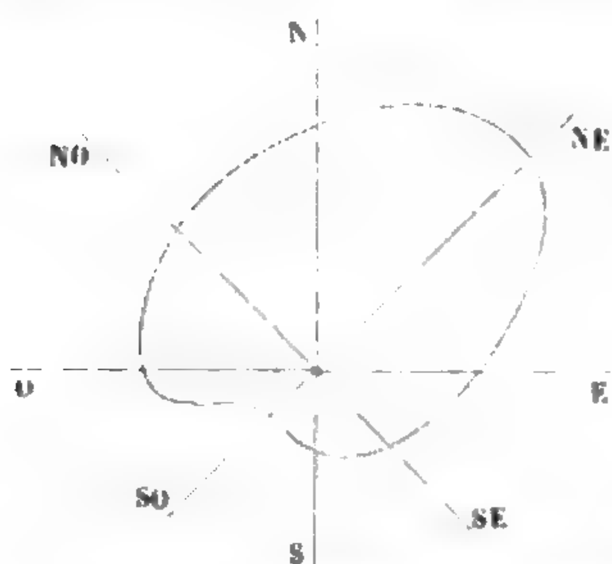


Fig. 124. — Rose barométrique des vents.

On doit donc s'attendre, d'après ces observations, à ce que la hauteur barométrique soit moyennement plus basse par les vents chauds et pluvieux que par les vents froids et secs. Ceci est rendu extrêmement sensible par la figure qui représente la rose barométrique moyenne des vents à Paris. Sur chacune des huit



Gravé chez Erhard.

directions principales du vent, on a porté des longueurs proportionnelles à l'excès de la pression sur la pression moyenne, 75 centimètres. L'aspect de la figure montre une variation brusque et très-prononcée dans la rotation du sud-est à l'ouest; c'est toujours, en effet, pendant qu'elle s'accomplit que se produisent les perturbations atmosphériques locales les plus graves.

116. Cartes synoptiques de l'Observatoire. — Depuis que le réseau télégraphique s'est développé à la surface de l'Europe, on a pu organiser un service de correspondance qui permet de connaître à un moment donné la pression régnant en un certain nombre de localités qui ont été choisies comme stations météorologiques.

En unissant par un trait continu les points qui correspondent à une même pression, on obtient ainsi des courbes que l'on trace sur une carte et qui montrent d'un seul coup d'œil l'état barométrique d'une portion notable de la surface terrestre; nous donnons ici (PL. I) un spécimen de ces cartes synoptiques, qui sont dressées chaque jour dans le service météorologique de l'Observatoire impérial; il se rapporte au 22 janvier 1868. On voit qu'indépendamment des courbes d'égale pression, ces cartes font connaître, par le système de notations indiquées à gauche de la figure, l'état général du temps, la force du vent et l'état de la mer. Les courbes d'égale pression correspondent à des différences de 5 millimètres, d'où résulte que suivant qu'elles sont plus ou moins serrées, elles accusent une variation plus ou moins brusque de pression, et donnent ainsi par ce premier aspect une indication précieuse sur l'état d'équilibre de l'atmosphère; car il est bien évident que les chances de perturbation atmosphérique sont d'autant plus grandes que la variation de pression est plus rapide.

L'étude de ces cartes nous montre quelquefois, et c'est ce qui a lieu dans l'exemple que nous avons choisi, que les courbes d'égale pression se ferment de manière à indiquer quelque part un centre de dépression barométrique. Deux centres de ce genre sont accusés, l'un au-dessus du sud de l'Angleterre, et l'autre vers la partie occidentale de la Russie. Une pareille circonstance s'accompagne toujours de troubles graves dans l'atmosphère. En effet, l'air afflue de toutes parts dans l'endroit où la pression est minima avec des

vitesses dont l'intensité et la direction sont variables; il en résulte un mouvement tournant qui, à raison de la force centrifuge, accroît notablement la dépression primitive, qui devient à la fois cause et effet du phénomène.

On donne différents noms à ces météores. Aux Antilles, dans les régions intertropicales, ils présentent une effroyable intensité et donnent lieu aux plus épouvantables désastres; on les nomme cyclones, typhons, tornados, ouragans. Dans des proportions moindres, on les appelle *bourrasques,* tourbillons, etc.; mais, quel que soit le nom, il convient de remarquer qu'ils sont toujours constitués par un phénomène de même nature qui forme ce qu'on peut appeler l'essence même de la tempête. Engendrées le plus souvent dans l'Atlantique, les bourrasques s'élèvent sensiblement vers le nord dans notre hémisphère, avec des mouvements d'inflexion vers l'est: à mesure qu'elles progressent, leur base s'élargit, et leur intensité devient moindre, à moins de circonstances particulières. Leur vitesse de translation est d'ailleurs relativement assez petite; quelquefois inférieure à 15 kilomètres, elle ne dépasse jamais 40 kilomètres à l'heure.

Il est donc possible par les cartes synoptiques de suivre la marche du phénomène d'un jour à l'autre et de calculer approximativement l'époque où la tempête abordera nos côtes. Un service d'avertissements aux ports est organisé à l'Observatoire, et déjà, en plusieurs occasions, on a pu, par des précautions prises en temps utile, prévenir des désastres considérables[1].

1. Nous renvoyons les lecteurs qui désireraient quelques détails sur cette partie nouvelle et originale de la météorologie à l'important ouvrage : *Les Mouvements de l'atmosphère,* de M. Marié-Davy, chef de la division de météorologie à l'Observatoire.

CHAPITRE XIV.

LOI DE MARIOTTE

117. Loi de Mariotte. — Les gaz étant formés de molécules dans un état de répulsion permanente, peuvent être considérés en quelque sorte comme des ressorts constamment tendus, et qui font continuellement effort pour se détendre. Le degré de pression que ces corps exercent sur les parois des vases qui les renferment doit donc dépendre du volume qu'ils occupent, et augmenter de plus en plus à mesure que ce volume diminue. Mariotte a déduit d'expériences nombreuses et précises que ce volume varie en raison inverse de la pression, pourvu toutefois que la température reste constante. Comme la densité varie évidemment en raison inverse du volume, on peut dire encore qu'à la même température la densité varie proportionnellement à la pression.

En appelant V et V' les volumes d'une même masse de gaz, P et P', D et D' les pressions et les densités correspondantes, la loi de Mariotte s'exprime par les relations

$$\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P} = \frac{D'}{D}.$$

118. Tube de Mariotte. — On peut vérifier l'exactitude de cette loi au moyen de l'appareil suivant, employé par Mariotte lui-même. Il se compose (fig. 125) d'un tube recourbé à branches inégales; la longue branche est ouverte, la petite branche fermée. Le tube est appliqué contre une planche portant une double graduation; l'une, en regard de la longue branche, est formée de parties d'égale

longueur; l'autre, placée sur la petite branche, correspond à des parties d'égale capacité. Les deux échelles ont une même origine en 0,0.

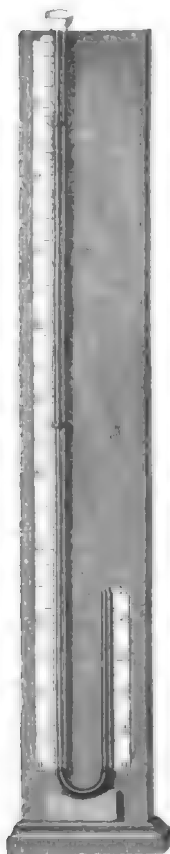


Fig. 125. — Tube de Mariotte.

On verse d'abord du mercure par l'extrémité de la longue branche, et en inclinant l'appareil dans un sens ou dans l'autre, ajoutant, s'il le faut, une nouvelle quantité de liquide, on arrive par tâtonnement à ce que le niveau soit le même dans les deux branches, et à la hauteur du zéro des échelles. On a ainsi dans la petite branche une masse d'air séparée de l'air extérieur, et à la même pression que celui-ci. On verse alors du mercure par la longue branche, de manière à réduire le volume d'air à sa moitié; on reconnaît, quand cette condition est remplie, que la différence de niveau du mercure dans les deux branches est égale à la hauteur du baromètre au moment de l'expérience; l'air comprimé fait donc équilibre à une pression de deux atmosphères. Si l'on verse encore du mercure, de façon à réduire le volume de l'air au tiers, au quart du volume primitif, on voit que la différence de niveau est de deux, trois fois la hauteur du baromètre, c'est-à-dire que l'air fait équilibre à une pression de trois ou quatre atmosphères. On voit donc, d'après cette expérience, que si le volume du gaz devient deux, trois, quatre fois plus petit, la pression devient deux, trois, quatre fois plus grande. C'est l'expression même de la loi de Mariotte.

On peut aussi vérifier la loi, dans le cas où le gaz se dilate et où par conséquent sa pression diminue. A cet effet on renverse dans une cuvette profonde un tube barométrique (fig. 126) que l'on a incomplétement rempli de mercure, et on le maintient dans une position telle, que le niveau du liquide soit le même à l'extérieur et à l'intérieur; c'est qu'alors l'air qu'il contient se trouve à la même pression que l'air extérieur. On note le volume occupé par le gaz et on soulève le tube; le gaz se dilate, sa pression diminue, et, en

vertu de l'excès de la pression atmosphérique, une colonne de mercure *ab* s'élève dans le tube, de telle façon que sa hauteur ajoutée à la pression de l'air dilaté fasse une somme égale à la pression atmosphérique. Or on remarque que si le volume de l'air devient double du volume initial, la colonne soulevée a une hauteur égale à la moitié de la hauteur barométrique, c'est-à-dire que l'air dilaté est à une pression d'une demi-atmosphère ; si le volume devient triple, la hauteur de la colonne est les 2/3 de celle du baromètre, c'est-à-dire que l'air dilaté a une pression de 1/3 d'atmosphère, résultat conforme à la loi de Mariotte.



Fig. 126.

119. La simplicité de la loi de Mariotte n'a pas peu contribué à la faire adopter par les physiciens, qui l'ont considérée pendant longtemps comme le fondement indiscutable de la mécanique des gaz. Toutefois à diverses époques quelques savants ont élevé des doutes, et sur sa généralité et sur son exactitude rigoureuse. Desprets a même publié vers 1825 un travail important, dans lequel il établit que les différents gaz ne subissent pas la même loi de compression, en prouvant expérimentalement que deux volumes égaux de deux gaz, tels que l'air et l'acide sulfhydrique ou l'ammoniaque par exemple, soumis à une forte pression, prennent des volumes différents; l'air se trouve sensiblement moins compressible que les deux autres gaz. On savait d'ailleurs que la loi de Mariotte doit éprouver une sorte d'arrêt au moment de la liquéfaction, qui se produit pour la plupart des gaz quand on les comprime assez fortement; car à partir de ce moment la pression ne varie plus. Nonobstant ces circonstances, la loi de Mariotte paraissait tellement conforme à l'idée qu'on se faisait *à priori* des corps gazeux, que la confiance des physiciens n'était nullement ébranlée. Aussi lorsqu'en 1829 Dulong et Arago entreprirent un travail considérable pour la soumettre à de nouvelles vérifications, ils le firent avec la pensée qu'elle ne se trouverait point en défaut.

Ce fut là en effet le résultat de leurs expériences, dans lesquelles l'air atmosphérique fut comprimé jusqu'à la pression énorme de 27 atmosphères. La question paraissait donc tranchée, au moins pour l'air.

120. Inégale compressibilité des différents gaz. — Il est pourtant facile de montrer, par une expérience analogue à celle de Desprets, que les différents gaz ne sont pas également compressibles. On se sert pour cela de l'appareil suivant, employé par M. Pouillet dans ses recherches sur le sujet qui nous occupe. Il se compose d'une boîte en fonte A renfermant du mercure, et au-dessus de l'huile. Dans ce dernier liquide s'enfonce un piston plongeur P en bronze, dont la partie supérieure, façonnée en vis, passe à travers un écrou et peut être mise en mouvement à l'aide du levier L. La boîte A communique par un tube de fer avec une deuxième boîte en fonte, sur laquelle sont solidement assujettis deux tubes T de 2 mètres de longueur environ, de 2 à 3 millimètres de diamètre et calibrés avec le plus grand soin. On introduit par les parties supérieures de ces tubes des gaz parfaitement desséchés, de façon qu'ils occupent le même volume, et on scelle au chalumeau les extrémités. On fait alors descendre le piston plongeur, et on exerce graduellement une pression de plus en plus considérable, on lit le volume occupé par les deux gaz, et on reconnaît aisément qu'il n'est pas possible d'en trouver deux qui suivent exactement la même loi de compression. La différence est toutefois très-peu sensible lorsqu'on opère

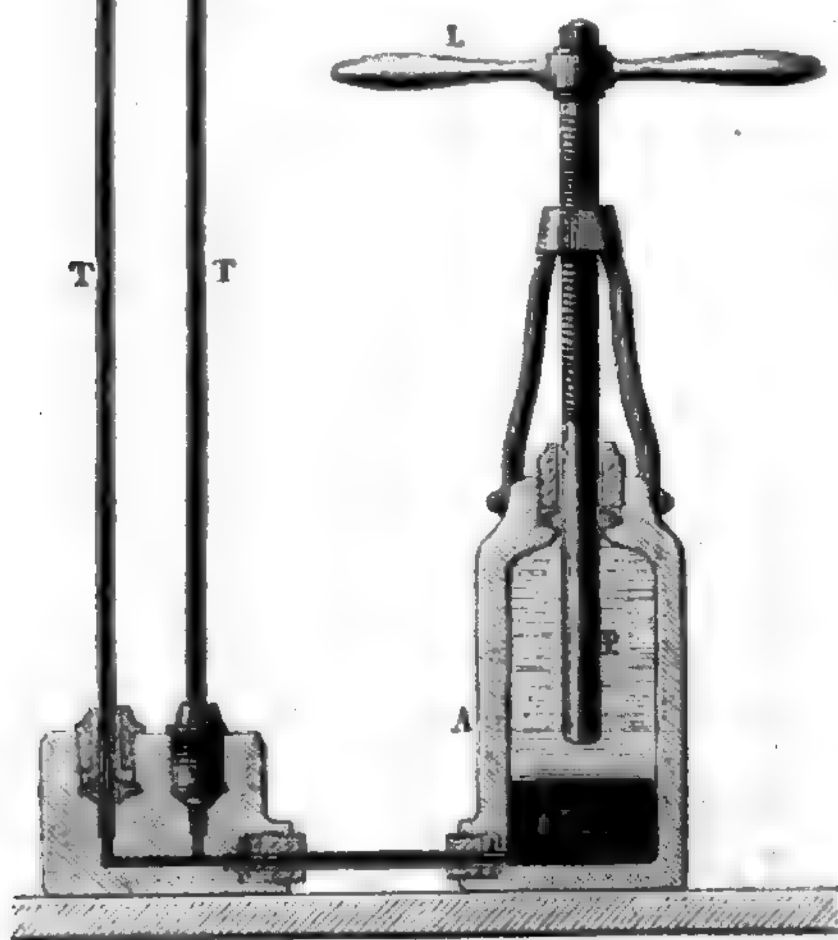


Fig. 127. — Appareil de M. Pouillet.

sur les gaz non liquéfiables, l'air, l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, le bioxyde d'azote, le gaz des marais et le gaz hydrogène protocarboné. Mais lorsqu'on compare un de ces derniers gaz à un gaz liquéfiable, tel que l'acide carbonique, le cyanogène, l'ammoniaque, le désaccord se manifeste très-rapidement et d'une façon très-nette. Ainsi, sous la pression de 25 atmosphères, l'acide carbonique occupe un volume qui n'est que les 4/5 de celui qu'occupe l'air.

121. Expériences de M. Regnault. — La loi de Mariotte ne saurait donc être considérée comme rigoureusement exacte; mais il est certain qu'elle est fort approchée et peut être employée sans aucun inconvénient dans la pratique, surtout lorsqu'il s'agit de l'air. Pour constater dans ce gaz, et en général dans les gaz non liquéfiables, l'inexactitude de la loi, pour mesurer surtout les éléments propres à faire connaître la compressibilité particulière d'un gaz déterminé, il faut des procédés de mesure d'une grande précision. Dans les diverses expériences faites sur ce point, et qui sont toujours fondées sur le même principe que celle de Mariotte, on a une masse limitée de gaz, dont on réduit successivement le volume à l'aide d'une pression graduellement croissante. Or il est clair que par ce mode d'expérimentation, à mesure que la pression augmente, les variations de volume deviennent de moins en moins sensibles, et, par suite, leur détermination de moins en moins précise. Dans les recherches que M. Regnault a exécutées sur ce point fondamental de la mécanique des gaz, on opère constamment sur le même volume, lequel, pris initialement à des pressions diverses, est constamment réduit à sa moitié. On observe la pression dans les deux circonstances, et si la loi de Mariotte était vraie, dans le second cas elle devrait être le double de ce qu'elle est dans le premier. De cette façon la précision de la mesure reste la même, quelle que soit la pression.

L'ensemble de l'appareil employé par M. Regnault est représenté par la figure 128. Il se compose d'un réservoir en fer contenant du mercure, muni à sa partie supérieure d'une pompe aspirante et foulante à eau. Par sa partie inférieure ce réservoir communique avec un cylindre également en fer qui porte deux tubulures. La

communication entre le réservoir et le cylindre peut d'ailleurs être établie ou supprimée à l'aide d'un robinet R exécuté avec une grande perfection. Dans l'une des tubulures se trouve engagée l'extrémité d'une série A de tubes de cristal placés bout à bout, réunis les uns aux autres par des garnitures métalliques solidement ajustées, et formant une colonne verticale d'environ 25 mètres.

Sur cette longue colonne manométrique, des points de repère placés de distance en distance à $0^m,95$ environ, et la division même des tubes placés à la partie supérieure, permettaient d'observer la position exacte de l'extrémité de la colonne mercurielle. Des thermomètres disposés à diverses hauteurs donnent la température moyenne de la colonne de mercure. Dans la seconde tubulure s'engage l'extrémité inférieure du tube B divisé en millimètres et, de plus, jaugé avec une grande exactitude. Ce

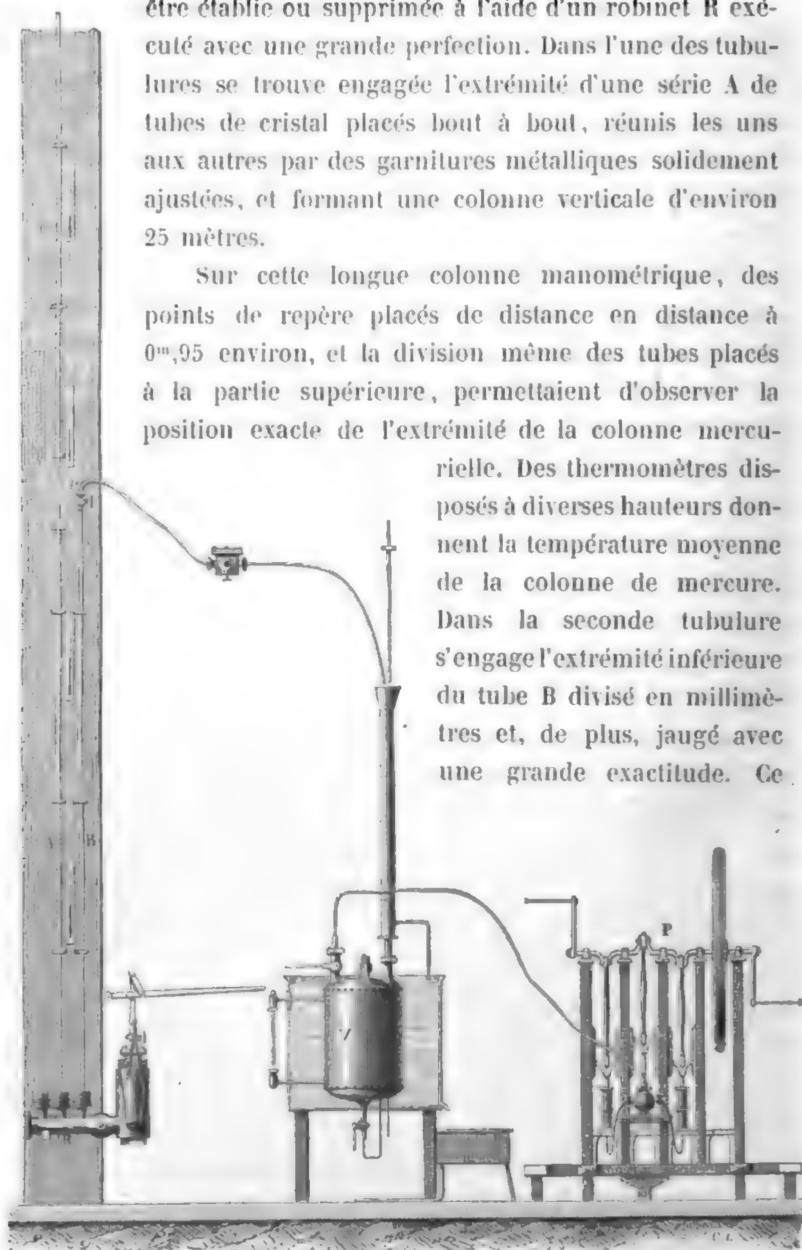


Fig. 128. — Appareil de M. Regnault.

tube porte à sa partie supérieure un robinet *r* pouvant communiquer avec le réservoir V où l'on peut comprimer le gaz soumis à l'expérience. Cette compression s'opère par le moyen de la pompe P.

Un manchon, dans lequel de l'eau se renouvelle d'une manière continue et qui n'est pas indiqué sur la figure, permet de maintenir le tube à une température sensiblement constante que fait connaître d'ailleurs un thermomètre très-sensible. Avant de mettre le tube en place, on détermine avec beaucoup de soin le point qui correspond au milieu de son volume, et lorsqu'il est placé, on relève la distance de ce même point au repère le plus voisin de la longue colonne [1].

Cela posé, voici comment on procède aux expériences. On fait arriver par la partie supérieure du tube le gaz sur lequel on veut opérer à l'état de dessiccation complète, on maintient ouvert le robinet de la pompe, ce qui permet au gaz de refouler le mercure et d'occuper le volume total du tube. On fait alors fonctionner la pompe foulante et on réduit le gaz à peu près à la moitié de son volume; dans les deux cas la hauteur du mercure dans le grand tube au-dessus du répère le plus voisin fait connaître la pression du gaz. Il est important de remarquer d'ailleurs qu'il n'est pas du tout nécessaire d'opérer exactement sur le même volume initial, ou de le réduire exactement à sa moitié, ce qui serait fort long; on réalise ces deux conditions à peu près, et la graduation du tube permet toujours de connaître les volumes véritables.

122. Résultats. — Le résultat général des recherches de M. Regnault est que la loi de Mariotte ne saurait représenter exactement la compressibilité des gaz, même non liquéfiables, tels que l'air, l'hydrogène, l'azote, qui ont précisément été étudiés par lui. Mais à cause des petites différences qui se produisent, cette consé-

1. L'appareil de M. Regnault était établi dans une petite tour carrée de 15 mètres de hauteur environ, faisant partie des bâtiments du Collége de France, et que Savart avait fait construire autrefois pour des expériences d'hydraulique. La partie inférieure seule de la colonne manométrique pouvait donc être contenue dans la tour : la partie supérieure s'élevait au-dessus de la terrasse, appuyée contre une sorte de mât le long duquel pouvait s'élever l'observateur. Dans l'intérieur de la tour les lectures pouvaient être faites à l'aide d'un cathétomètre, mais cela était impossible dans la portion supérieure, et c'est pour cela que les tubes formant cette dernière étaient divisés.

quence serait peut-être difficile à faire ressortir si l'on se bornait à comparer les nombres qui représentent les volumes et les pressions. Elle apparaît au contraire clairement si l'on soumet les résultats obtenus à l'épreuve suivante. Considérons une certaine masse de gaz qui, sous la pression P, occupe le volume V, et réduisons-la au volume V'; la pression deviendra par cela même P', et si la loi de Mariotte était vraie, on devrait avoir la relation

$$\frac{V}{V'} = \frac{P'}{P} \quad \text{ou} \quad VP = V'P'$$

ou bien

$$\frac{VP}{V'P'} - 1 = 0.$$

Or on reconnaît que pour les gaz autres que l'hydrogène cette différence n'est jamais nulle; non-seulement sa valeur est sensible, mais, ce qui est surtout important à remarquer, elle croît régulièrement avec la pression, ce qui ne permet pas de l'attribuer à des erreurs inévitables d'observation.

Si sur une droite quelconque on porte des longueurs proportionnées aux diverses pressions, et qu'on élève des perpendiculaires proportionnelles à la différence $\frac{VP}{V'P'} - 1$, en unissant les extrémités de ces perpendiculaires par un trait continu, on obtient une courbe régulière et qui est évidemment la représentation graphique de la loi de compressibilité du gaz dont il s'agit. Ces courbes ont été tracées avec un très-grand soin par M. Regnault; on peut, du reste, par les procédés ordinaires de l'interpolation, en trouver l'expression algébrique, et c'est à elle qu'il conviendra d'avoir recours quand on voudra calculer rigoureusement la variation de volume correspondante à une très-grande pression.

Puisque la différence $\frac{VP}{V'P'} - 1$ a une valeur sensible, c'est que V'P' est plus petit que VP, et par suite qu'à une pression déterminée P' correspond un volume V' plus petit que celui que fournit la loi de Mariotte. On voit donc qu'en général les gaz sont un peu plus compressibles que ne l'indique la loi de Mariotte; quand il

s'agit de gaz liquéfiables, cette différence de compressibilité est, comme nous l'avons dit, assez notable.

L'hydrogène offre, à cet égard, une exception remarquable, et qui avait été déjà prévue par Despretz dans les expériences que nous avons rappelées; il est moins compressible que ne l'indique la loi de Mariotte, la différence $\frac{VP}{V'P'} - 1$ est négative.

Cette particularité singulière de l'hydrogène est d'ailleurs en harmonie avec ce que l'on suppose de la nature de ce gaz. On a reconnu, en effet, par quelques expériences comparatives faites sur l'acide carbonique, qu'à la température de 100° la loi de compressibilité de ce gaz s'éloigne beaucoup moins de la loi de Mariotte qu'elle ne le fait aux températures ordinaires. On peut donc légitimement supposer que si l'on opérait à une température plus élevée encore, on se rapprocherait de plus en plus de la loi qui se vérifierait sans doute à une température déterminée, et se trouverait en erreur au delà en sens inverse. Il semble donc qu'il y ait pour chaque gaz une sorte de température normale, pour laquelle la compressibilité est fidèlement représentée par la loi de Mariotte.

La compressibilité décroîtrait d'ailleurs avec la température, comme le prouve l'expérience faite sur l'acide carbonique. Tous les gaz autres que l'hydrogène se trouvent dans les conditions ordinaires, au-dessous de cette température normale. Mais si, comme l'indiquent les phénomènes chimiques, l'hydrogène est une sorte de métal, on ne saurait douter qu'il ne soit dans un très-grand état de raréfaction relative, et dès lors la particularité que présente sa compressibilité se trouve toute naturelle.

123. Manomètres. — Les manomètres sont des instruments destinés à mesurer la force élastique d'un gaz renfermé dans l'intérieur d'un espace clos. Cette force élastique s'exprime ordinairement à l'aide d'une unité appelée atmosphère (103), et se mesure fréquemment par la hauteur de la colonne de mercure qui lui fait équilibre.

Lorsque la colonne de mercure se meut librement dans un

tube ouvert, on dit que le manomètre est à air libre; c'est un manomètre de cette sorte qui, dans les expériences de M. Regnault, sert à mesurer les pressions auxquelles on soumet successivement le volume gazeux.

Lorsque dans l'industrie on a à mesurer des pressions qui ne sont pas considérables, on se sert quelquefois du manomètre à air libre, dont la figure représente une des dispositions les plus simples. L'appareil se compose d'une boîte généralement en fer, présentant supérieurement une ouverture fermée par un bouchon à vis; à travers le bouchon passe un tube *b* ouvert aux deux bouts et plongeant par sa partie inférieure dans le mercure que renferme la boîte. L'air ou la vapeur dont on veut mesurer la force élastique pénètrent par le tube *a* et agissent sur le mercure. Il est évident que si le niveau du liquide était le même dans le tube et dans la cuvette, c'est que la pression régnant dans la boîte serait précisément égale à la pression atmosphérique. Si le mercure dans le tube s'élève au-dessus du liquide dans la cuvette d'une certaine quantité, c'est que la pression surpasse la pression atmosphérique de celle qui correspond à la hauteur de la colonne soulevée. Ordinairement ces pressions effectives sont inscrites en atmosphères sur une échelle placée à côté du tube.

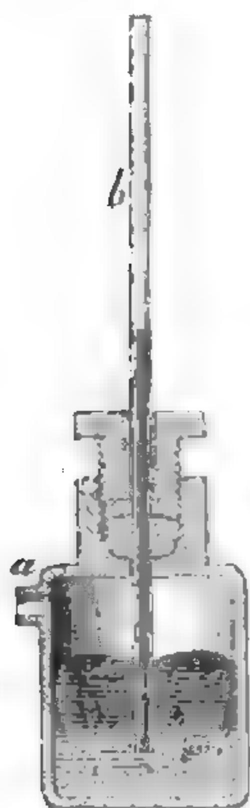


Fig. 129. Manomètre à air libre.

124. Manomètre à branches multiples. — Lorsque les pressions à mesurer sont un peu considérables, il faut, si l'on veut employer l'instrument précédent, lui donner une longueur en rapport avec la pression elle-même. Si, par exemple, il s'agit d'une pression de 8 atmosphères, le tube devra avoir une longueur au moins égale à $0{,}76 \times 7 = 5^{m}{,}32$. Cette disposition, peu commode déjà quand il s'agit des machines fixes, est entièrement inapplicable aux machines mobiles.

Tout en conservant le principe du manomètre à air libre, c'est-à-dire l'action de l'atmosphère sur l'extrémité de la colonne, on parvient à réduire la longueur de l'instrument par un artifice déjà employé par Fahrenheit dans son baromètre (110).

L'appareil est construit de la manière suivante : il se compose d'un tube en fer ABCD recourbé un certain nombre de fois sur lui-même. L'extrémité A communique avec la chaudière par l'intermédiaire d'un robinet; quant à la dernière branche CD, elle est en verre et placée en regard d'une échelle divisée.

On commence par remplir l'appareil de mercure jusqu'au niveau MN; à cette hauteur se trouvent des trous par lesquels le mercure s'échappe quand il y arrive et qu'on ferme hermétiquement. On remplit d'eau les parties supérieures par l'intermédiaire d'ouvertures qu'on bouche également après le remplissage. Si le mercure baisse d'une quantité h dans le premier tube en communication avec le réservoir de gaz, il baissera et s'élèvera alternativement de la même quantité dans chacun des tubes, et par conséquent il s'élèvera de la même quantité dans le dernier tube; or cette hauteur correspond à une pression effective représentée par une colonne de mercure égale à $10h$ diminué de 10 fois la même hauteur d'eau; c'est-à-dire en exprimant tout en mercure à $10\,h\left(1-\frac{1}{13,59}\right)$. On voit par conséquent qu'une pression assez considérable se manifestera par une variation relativement petite de la colonne de mercure. Si, par exemple, à partir de l'état initial qui correspond à la pression atmosphérique, il se produit un accroissement de 5 atmosphères, ce qui veut dire que la pression effective est de 6 atmosphères, la quantité h sera donnée par l'équation

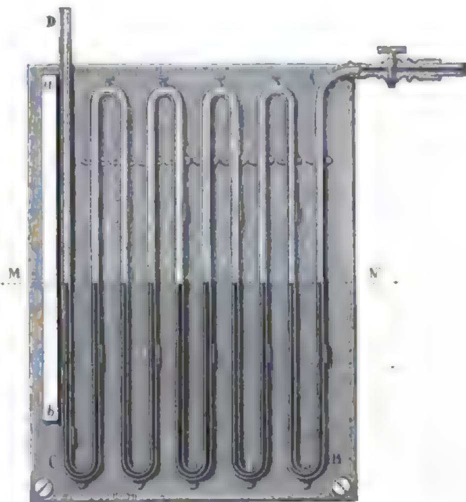


Fig. 130. — Manomètre à branches multiples.

$$5 \times 0^{m},76 = 10\,h\left(1-\frac{1}{13,59}\right),$$

d'où

$$5 \times 0,76 \times 13,59 = 10\,h\,.\,12,59,$$
$$h = 0^{m},40.$$

125. Manomètre à air comprimé. — Cet instrument, auquel on peut donner des dispositions diverses, est formé quelquefois, comme le montre la figure 131, d'un tube recourbé AB fermé à l'une de ses extrémités et renfermant en A*a* de l'air qui se trouve séparé de l'air extérieur par une colonne de mercure. L'appareil a été réglé de telle façon que quand il règne en B une pression égale à celle de l'atmosphère, le mercure s'élève en *m n* au même niveau dans les deux branches du tube, de sorte que, dans ce cas, l'air confiné est précisément à la pression atmosphérique. Mais si la pression vient à augmenter, le mercure est refoulé dans la branche de gauche, l'air que celle-ci renferme se comprimant prend une tension graduellement plus forte, et finit par amener l'équilibre.

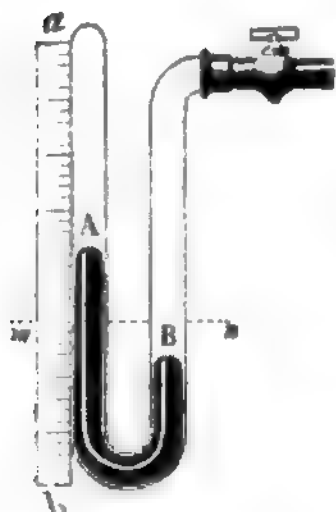


Fig. 131. Manomètre à air comprimé..

La pression du gaz qui agit en B est égale alors à la pression de l'air comprimé, augmentée de celle que mesure la différence de niveau du mercure dans les deux branches. Cette pression est inscrite en atmosphères sur l'échelle divisée *ab*.

Cette échelle se gradue directement dans les ateliers, en mettant le manomètre en communication avec un réservoir à air comprimé dont la pression est donnée soit par un manomètre à air libre, soit par un manomètre étalon d'une forme quelconque.

En supposant le tube AB cylindrique, la graduation pourrait être faite *à priori* en appliquant la loi de Mariotte.

Supposons que l représente la longueur du tube occupé par l'air confiné lorsque sa pression est égale à celle d'une atmosphère; au point où le mercure arrive se trouve le nombre 1. Cherchons à quel point devra se trouver l'extrémité de la colonne liquide lorsque la pression agissant en B sera de n atmosphères. Soit x la hauteur de ce point au-dessus de 1, le volume de l'air qui était primitivement l est devenu $l-x$, et sa pression d'après la loi de Mariotte est égale à $H\frac{l}{l-x}$, H désignant la hauteur moyenne du baromètre.

C'est cette pression qui, ajoutée à la différence de niveau $2x$, équivaut à n atmosphères. On a donc l'équation

$$H\frac{l}{l-x}+2x=nH,$$

d'où

$$2x^2-(nH+2l)x+(n-1)Hl=0,$$

$$x=\frac{nH+2l\pm\sqrt{(nH+2l)^2-8(n-1)Hl}}{4}.$$

On trouve ainsi deux valeurs de x; mais celle qui correspond au signe + du radical est inadmissible; car si l'on suppose $n=1$, on doit avoir $x=0$, et cela n'a lieu que pour la valeur qui correspond au signe *moins*.

Si dans cette valeur de x on fait successivement $n=1\frac{1}{2}$, 2, $2\frac{1}{2}$, 3, etc., on aura les points de l'échelle correspondants aux pressions de une atmosphère et demie, deux atmosphères, etc.

Ainsi que nous l'avons remarqué plus haut, à mesure que la pression augmente, l'instrument devient de moins en moins sensible, et la course du mercure pour une variation de pression d'une atmosphère est de plus en plus petite. On atténue cet inconvénient par la disposition indiquée par la figure 132. La branche qui contient l'air a une forme conique; de cette façon, à mesure que le mercure monte, les mêmes variations de volume correspondent à une plus grande longueur. Le résultat de cette disposition est manifeste à l'inspection de l'échelle; on voit en effet que les chiffres qui correspondent aux atmosphères successives de pression sont presque équidistants, tandis que lorsque le tube est cylindrique ils vont en se rapprochant très-rapidement.

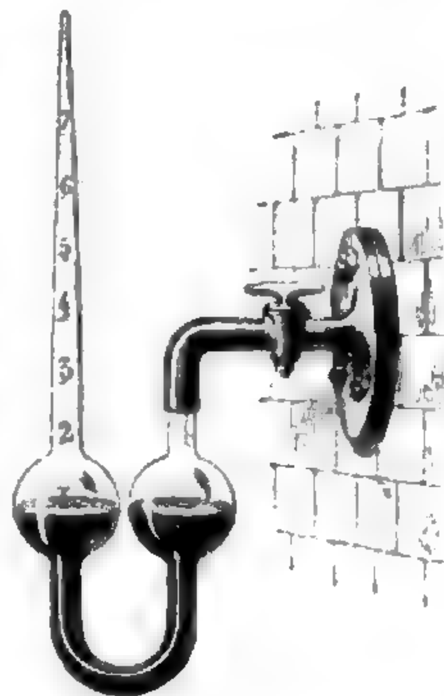


Fig. 132. — Manomètre à air comprimé.

126. Manomètres métalliques. — La fragilité des tubes de verre, leur encrassement résultant de ce que le mercure se salit à la longue, constituent, surtout pour les machines en mouvement, un inconvénient des plus graves. Aussi se sert-on souvent de mano-

mètres métalliques fondés sur les changements de forme que la pression du gaz ou de la vapeur peut faire subir à des systèmes solides combinés d'ailleurs diversement. Nous mentionnerons seulement ici le manomètre de Bourdon (fig. 133). Il a pour organe essentiel un tube en cuivre à section elliptique et contourné deux fois sur lui-même. L'une des extrémités est mise en communication par un robinet avec le réservoir de pression ; à l'autre extrémité est fixée une aiguille d'acier qui parcourt les divisions d'un cadran. Lorsque le robinet est en communication avec l'atmosphère, l'extrémité de l'aiguille s'arrête à la division 1. Mais si la pression augmente, la courbure diminue, l'extrémité mobile du tube s'éloigne de l'autre et l'aiguille parcourt les diverses divisions du cadran.

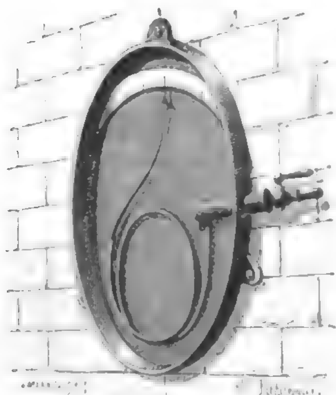


Fig. 133. — Manomètre de Bourdon.

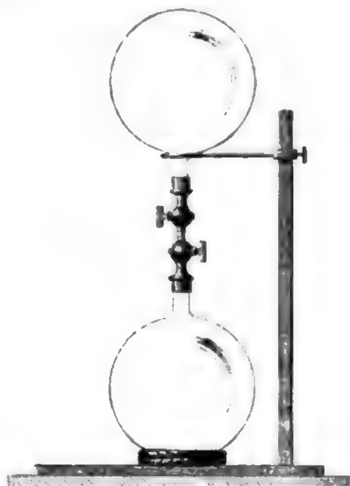


Fig. 134. — Mélange des gaz.

127. Mélange des gaz. — Lorsque des gaz de densité différente sont placés dans un même espace, ils ne se superposent point comme les liquides dans l'ordre de leurs densités. L'expérience prouve que, même dans les cas les plus défavorables, le mélange se fait d'une manière intime, de façon qu'on peut considérer chaque gaz en particulier comme remplissant l'espace total. Ce fait a été démontré par une expérience très-décisive due à Berthollet. Il prit deux ballons (fig. 134) pouvant se visser l'un sur l'autre et les plaça dans une cave. Le ballon inférieur était plein d'acide carbonique, le

ballon supérieur d'hydrogène. La communication fut établie entre les deux, et au bout d'un certain temps on constata que les deux gaz s'étaient mêlés d'une manière intime ; en effet, dans les deux ballons la proportion d'acide carbonique et d'hydrogène était exactement la même. La constance de la composition de l'air à toutes les hauteurs est une preuve frappante du fait dont nous parlons.

Il résulte de là que si plusieurs gaz sont renfermés dans un même espace, chacun d'eux exerce une pression qui dépend du volume total de l'espace, et que par conséquent la pression du mélange est égale à la somme des pressions exercées individuellement par les différents gaz. La loi de Mariotte permet de déterminer facilement ces pressions individuelles, quand on connaît la pression et le volume primitif de chacun des gaz.

Soient par exemple V et P, V' et P', V'' et P'', les volumes et les pressions de gaz que l'on fait passer dans un vase de volume U. Le premier gaz exerce dans ce vase une pression égale à $\frac{VP}{U}$, le second une pression égale à $\frac{V'P'}{U}$, le troisième une pression égale à $\frac{V''P''}{U}$, et ainsi de suite, de sorte que la pression totale M est égale à $\frac{VP}{U} + \frac{V'P'}{U} + \frac{V''P''}{U}$, d'où $MU = VP + V'P' + V'P''' + \text{etc.}$

Cette formule résume les lois du mélange des gaz ; on peut facilement la vérifier sur la cuve à mercure en faisant passer sous une cloche graduée divers volumes de gaz mesurés à l'avance et dont la pression est également connue.

128. Dissolution des gaz dans l'eau. — L'eau jouit de la propriété de dissoudre dans des proportions diverses tous les gaz que nous connaissons. Cette propriété a une importance naturelle considérable ; ainsi c'est grâce à l'air et par suite à l'oxygène que l'eau tient en dissolution que peut se faire la respiration des animaux aquatiques. La présence de cet air n'est pas moins nécessaire dans le rôle que joue l'eau dans notre alimentation ; l'expérience a prouvé en effet que l'usage d'eau privée d'air donne lieu à la longue à des désordres plus ou moins graves dans l'organisation. La propriété de dissoudre les gaz n'est pas du reste particulière à l'eau, bien que ce soit le liquide qui la manifeste de la manière la plus générale.

Le mécanisme de la dissolution dans l'eau est tout à fait analogue à celui de l'expansion d'un gaz dans un volume plus considérable. Si, par exemple, on suppose un espace contenant un litre d'acide carbonique mis en communication avec un espace vide de même capacité, il est clair que le gaz se partagera également entre les deux espaces. Si, au lieu d'un espace vide, on offre à l'acide carbonique un espace plein d'eau, le résultat sera exactement le même, et il y aura, quand l'équilibre sera établi, en dissolution dans l'eau, une quantité de gaz égale à celle qui se trouve au dehors du liquide. Le gaz dissous a donc, dans ce cas particulier, la même densité que le gaz extérieur. Mais il n'en est pas toujours ainsi, et suivant que l'attraction entre les molécules de l'eau et celles du gaz est plus ou moins considérable, il s'établit un rapport plus ou moins grand entre la densité du gaz dissous et celle du gaz extérieur. Ce rapport est égal à 0,04 environ pour l'oxygène, tandis que pour l'ammoniaque il est égal à 1050. Il conserve la même valeur quelle que soit la pression; on lui donne le nom de *coefficient de solubilité*. On voit d'après cela que le coefficient de solubilité de l'acide carbonique est égal à 1. Le coefficient de solubilité diminue d'ailleurs assez rapidement quand la température augmente; à 100° l'eau a perdu la totalité des gaz qu'elle tenait en dissolution; on profite précisément de cette circonstance pour recueillir ces gaz et les analyser.

Au lieu de dire que le rapport de la densité du gaz dissous au gaz extérieur est par exemple 1/5, on peut évidemment dire que l'eau tient en dissolution 1/5 de son volume du gaz considéré. C'est souvent de cette manière qu'on définit le coefficient de solubilité. Comme d'ailleurs ce coefficient est indépendant de la pression, on doit en conclure que la quantité de gaz qui se dissout effectivement dans l'eau varie proportionnellement à la pression. C'est sur cette remarque que se fonde la fabrication des eaux gazeuses artificielles.

CHAPITRE XV.

MACHINE PNEUMATIQUE. — MACHINE DE COMPRESSION.

129. Machine pneumatique. — La machine pneumatique a été imaginée par Otto de Guericke vers 1650; depuis elle a subi quelques perfectionnements de détail qui n'en ont pas changé les dispositions essentielles.

Elle se compose d'un corps de pompe en verre ou en métal dans lequel se meut un piston. Ce piston est percé d'un canal que

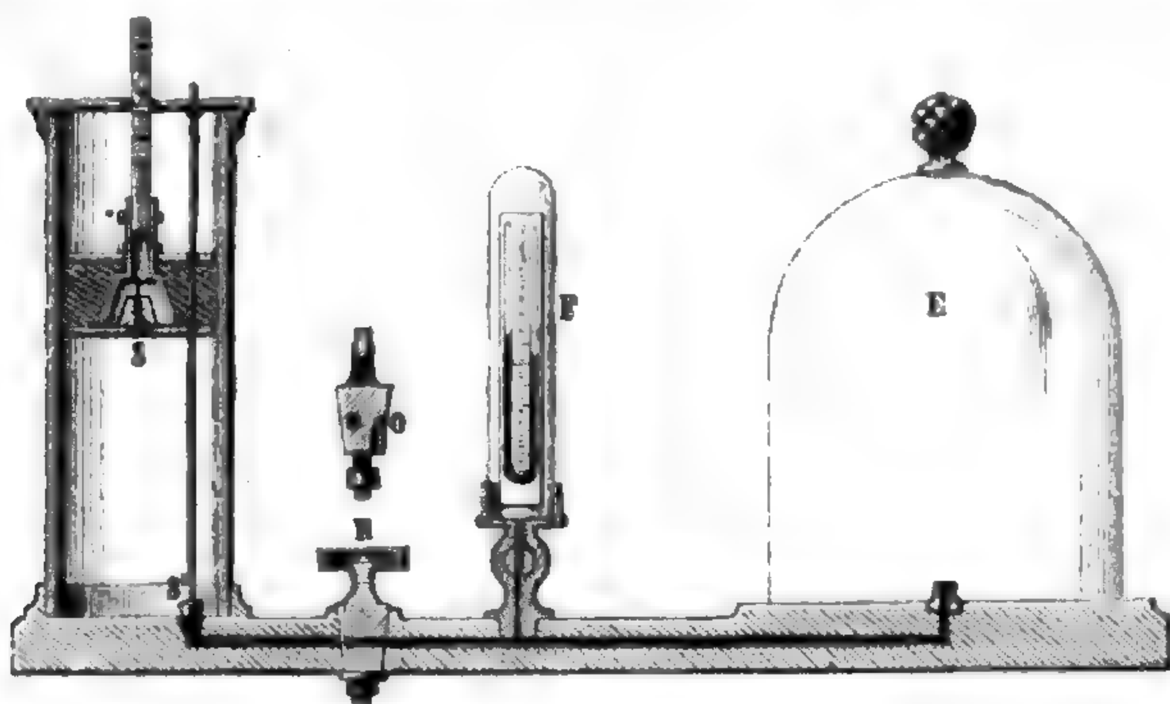


Fig. 135. — Machine pneumatique.

ferme inférieurement une soupape S s'ouvrant de bas en haut. Le corps de pompe communique avec un canal recourbé qui vient s'ouvrir au centre d'une surface en glace doucie avec le plus grand soin et qu'on nomme platine.

L'ouverture du canal est fermée par le bouchon conique S′, fixé à l'extrémité d'une tige métallique qui traverse à frottement dur le

piston, de sorte que le bouchon s'élève ou s'abaisse avec le piston lui-même. Un renflement placé à la partie supérieure de la tige limite la course du bouchon et ne lui permet de s'élever que d'une petite quantité au-dessus de l'ouverture qu'elle doit périodiquement fermer.

Cela posé, supposons que le piston soit au bas de sa course et qu'on l'élève, la soupape S' est soulevée et l'air du récipient E se répand dans le corps de pompe. En abaissant le piston, la soupape S' ferme l'ouverture correspondante, l'air qui a passé dans le corps de pompe ne peut plus retourner dans le récipient; il se comprime, finit par soulever la soupape du piston et s'échappe à l'extérieur. En soulevant de nouveau le piston, une portion de l'air restant dans le récipient passera dans le corps de pompe, d'où il s'échappera à l'extérieur lorsqu'on abaissera le piston, et ainsi de suite.

On voit donc qu'en continuant à faire mouvoir le piston, on enlèvera à chaque fois une nouvelle portion de l'air du récipient. Néanmoins la quantité d'air qu'on enlève à chaque coup de piston n'étant qu'une fraction de celle qui reste, on ne saurait jamais faire le vide absolu, mais théoriquement on pourrait en approcher autant qu'on le voudrait.

130. Calcul du degré de vide. — Il est facile, en se fondant sur la loi de Mariotte, de calculer la force élastique de l'air restant dans le récipient, après un nombre quelconque de coups de piston. Soient V le volume du corps de pompe, V' celui du récipient et P la pression de l'air au commencement. Lorsqu'on élève le piston, l'air qui occupait le volume V' se répand dans le volume V' + V; sa pression sera donc $P\frac{V'}{V'+V}$; après le second coup de piston, cette pression sera $P\left(\frac{V'}{V+V'}\right)^2$ et par conséquent après le $n^{ième}$ coup, $P\left(\frac{V'}{V+V'}\right)^n$. Si on désigne par π cette pression, on aura $\pi = P\left(\frac{V'}{V+V'}\right)^n$: équation de laquelle on déduira l'une quelconque des quantités qu'elle renferme, quand on connaîtra les quatre autres.

On voit du reste que la pression π va en décroissant indéfini-

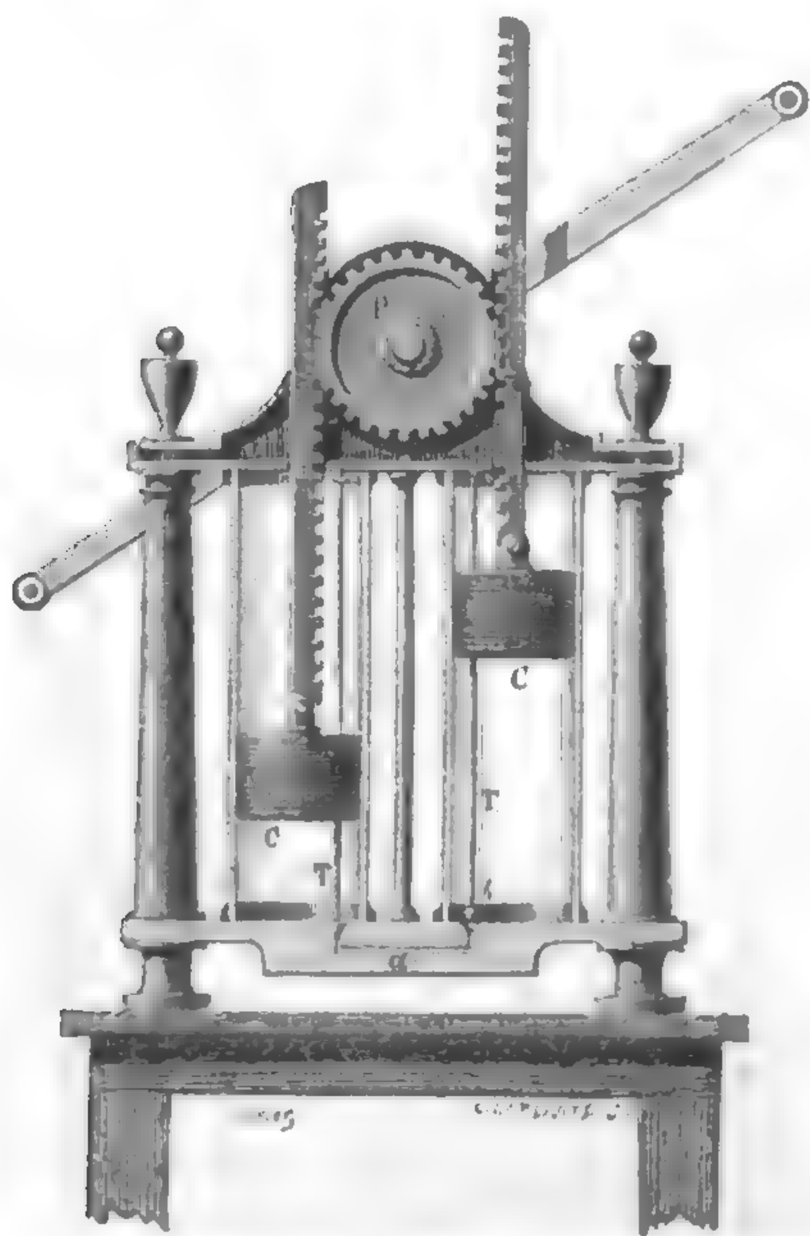
ment et par suite que la force élastique de l'air peut, théoriquement du moins, devenir plus petite que toute quantité donnée.

131. Éprouvette. — Pour suivre les phases de l'opération et connaître à chaque instant la force élastique de l'air du récipient, on se sert d'un baromètre tronqué renfermé dans une petite cloche F qu'on nomme éprouvette et qui peut être mise en communication par un robinet avec le récipient. Ce baromètre est formé d'un tube recourbé dont les branches ont de 28 à 30 centimètres de longueur; l'une d'elles est fermée et remplie de mercure, l'autre est ouverte. Lorsque la pression de l'air dans le récipient devient plus faible que celle qui est représentée par une colonne de mercure égale à la longueur de la branche fermée du baromètre, le mercure descend et à chaque instant la force élastique est donnée par la différence de niveau du métal dans les deux branches; une échelle divisée permet de mesurer exactement cette différence. Le baromètre tronqué sert à apprécier si la machine fonctionne bien; dans le cas, par exemple, où de l'air rentrerait quelque part, on s'en apercevrait aux oscillations de la colonne de mercure. On reconnaît aussi le moment où l'on a atteint la limite d'effet possible de la machine, lorsque malgré le mouvement du piston la différence de niveau du mercure reste stationnaire. Théoriquement, ainsi que nous l'avons dit précédemment, il n'y a pas de limite à l'action de la machine, et à chaque coup de piston la force élastique de l'air doit diminuer; mais dans la réalité il ne saurait en être ainsi, par suite de l'imperfection inévitable de l'appareil : il y a toujours une limite d'autant plus reculée d'ailleurs que la machine est mieux construite, et le baromètre fait connaître le moment où elle est atteinte. Au lieu d'un baromètre tronqué, on pourrait mettre en rapport avec le récipient un baromètre ordinaire, et suivre ainsi les progrès du vide dès les premiers coups de piston.

132. Robinet de rentrée. — Lorsque le vide est fait sous le récipient, si on voulait enlever ce dernier de dessus la platine, il faudrait développer un effort très-considérable, égal à autant de fois 103 kilogrammes que la section du récipient renferme de décimètres carrés. Ce serait donc une opération généralement inexécutable. On la rend possible en faisant rentrer l'air à l'aide du robi-

net R dont la clef est représentée séparément au-dessus. Cette clef est percée de part en part d'une ouverture qui, dans l'état ordinaire de la machine, est placée dans l'axe du canal de communication. A 90° de cette ouverture s'en trouve une autre O qui forme l'extrémité d'un canal recourbé s'ouvrant à l'extérieur. Si l'on veut faire rentrer l'air dans le récipient, il suffira de tourner la clef de façon que l'ouverture O soit dirigée de son côté; si on la tourne au contraire du côté du corps de pompe, on intercepte toute communication de celui-ci avec le récipient, les chances de rentrée de l'air deviennent moindres et le vide peut se conserver plus longtemps. On prend cette précaution quand on veut abandonner un corps pendant longtemps dans le vide. On se sert aussi souvent, dans ce cas, de platines distinctes et indépendantes, ce qui permet de conserver disponible la machine elle-même.

133. Machine à double effet. — La machine que nous venons de décrire est à un seul corps de pompe; on s'en sert quelquefois sous cette forme, on la dit alors à simple effet, et le piston se manœuvre ordinairement à



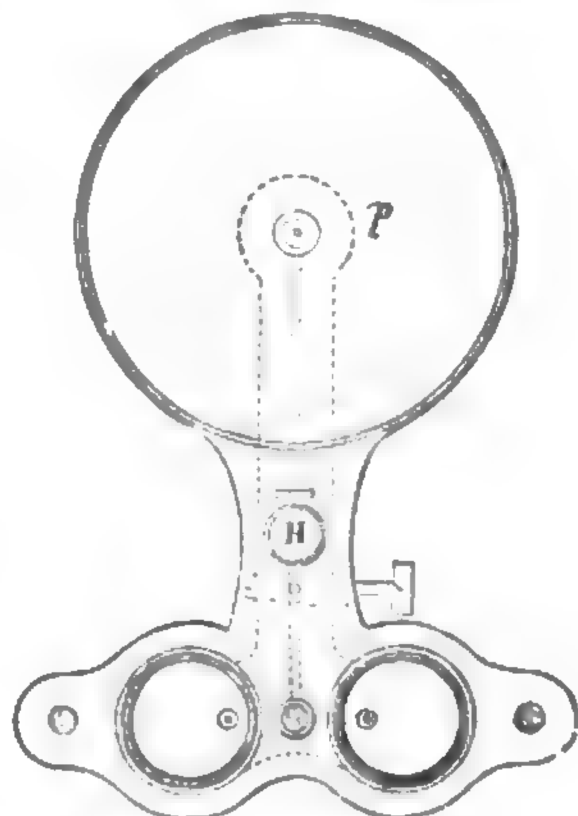


Fig. 136. Machine pneumatique à deux corps. Fig. 137.

l'aide d'un levier analogue à celui qu'on emploie pour les pompes. Avec cette disposition, il faut évidemment que le piston, après avoir

exécuté son mouvement ascensionnel, redescende pour expulser l'air du corps de pompe, et ce n'est qu'après ce double mouvement que l'opération peut recommencer.

La plupart des machines qu'on rencontre dans les cabinets de physique sont à deux corps de pompe; les figures 136, 137 et 138



Fig. 138. — Machine pneumatique.

donnent une idée de la disposition ordinaire de ces appareils. La figure 138 est une vue perspective de la machine, la figure 136 est une section par l'axe des corps de pompe, et la fignre 137 représente la manière dont sont établies les communications entre les corps de pompe et le récipient. On voit que les deux canaux des corps de pompe viennent aboutir à un canal unique qui va se rendre au centre de la platine *p*.

Les tiges des pistons C sont formées par deux crémaillères qui engrènent avec le pignon P. L'axe de ce pignon est mis en mouvement par un levier qu'on tourne alternativement dans un sens et

dans un autre. De cette façon, quand l'un des pistons monte, l'autre descend, et par suite, à chacun de ces mouvements, l'air du récipient passe dans l'un ou dans l'autre corps de pompe. A cause de cette circonstance la machine est dite à double effet, et le vide se fait évidemment deux fois plus rapidement qu'avec la machine à un seul corps. Il y a d'ailleurs un autre avantage : dans la machine à simple effet, à mesure que l'air se raréfie dans le récipient, la force nécessaire pour soulever le piston devient de plus en plus considérable; lorsque le vide est presque fait, on a à vaincre une résistance d'environ une atmosphère, c'est-à-dire de 103 kilogrammes par décimètre carré de surface. Dans la machine à deux corps, au moment où les pistons sont l'un en haut, l'autre en bas des corps de pompe, si on les fait mouvoir, la force qui s'oppose au mouvement ascensionnel de l'un est précisément égale à celle qui favorise le mouvement descendant de l'autre. Il faut remarquer toutefois que cette égalité n'a lieu qu'au commencement du mouvement, car à mesure que l'un des pistons descend, l'air se comprime au-dessous de lui, sa tension devient de plus en plus forte et atteint la pression atmosphérique au moment où la soupape du piston se soulève. A ce moment la résistance qu'éprouve le second piston n'est compensée par rien, et elle a été jusque-là diminuée par une force graduellement décroissante. Plus on s'approche du vide d'ailleurs, plus la tension de l'air comprimé au-dessous du piston augmente lentement, de sorte que, contrairement à ce qui a lieu dans la machine à simple effet, la manœuvre de la machine à deux corps est d'autant plus aisée que l'air est déjà plus raréfié.

134. Machines à un seul corps et à double effet. — Il n'est, du reste, pas nécessaire d'employer deux corps de pompe pour obtenir le double effet, on peut n'employer pour cela qu'un seul corps. Cette disposition, très-anciennement connue et employée dans les pompes, d'après les indications de Delahire, n'a été utilisée que récemment par les constructeurs de machines pneumatiques.

La figure 139 représente le corps unique de la machine à double effet de M. Bianchi. On voit que la soupape du piston s'ouvre dans la tige creuse de celui-ci ; une seconde soupape, s'ouvrant aussi de

bas en haut, est placée à la partie supérieure du corps de pompe. D'autre part, deux ouvertures, l'une supérieure, l'autre inférieure, établissent à l'aide d'un tube vertical recourbé la communication du corps de pompe avec le canal qui se rend à la platine. Ces ouvertures sont alternativement fermées par deux bouchons coniques, portés à l'extrémité d'une tige métallique qui traverse le piston à frottement dur. Lorsque le piston monte, ce qui est le cas de la figure, l'ouverture supérieure est fermée et l'inférieure libre; si le piston vient à descendre, immédiatement c'est l'inverse qui se produit. D'après cela on voit que, quel que soit le sens du mouvement du piston, le vide se fera dans le récipient. En effet, si le piston monte, l'air du récipient arrivera par l'ouverture inférieure, et au-dessus du piston l'air graduellement comprimé finira par s'échapper par la soupape supérieure. Dans le mouvement descendant, l'aspiration aura lieu par l'ouverture supérieure et l'air comprimé au-dessous du piston s'échappera par la soupape du piston lui-même. Le mouvement du piston est obtenu par un dispositif particulier que l'on voit dans la figure 140, qui représente une vue d'ensemble de l'appareil.

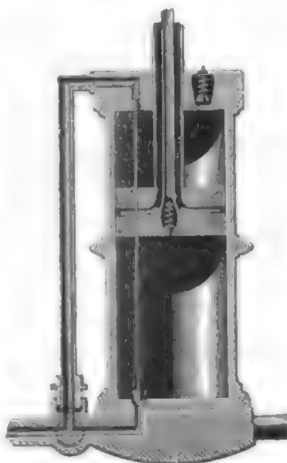


Fig. 139. — Corps de pompe de la machine de M. Bianchi.

Le corps de pompe, entièrement en fonte, est rendu oscillant autour d'un axe qui passe par sa base. A sa partie supérieure est fixée une glissière dans laquelle se meut le bouton d'une manivelle à laquelle on imprime un mouvement de rotation. A cet effet, on se sert d'un volant massif en fonte dont l'axe porte un pignon qui engrène avec une roue dentée fixée sur l'axe de la manivelle. Au bouton de la manivelle est articulée l'extrémité de la tige du piston. Il suit de là évidemment que si on fait tourner le volant, le corps de pompe s'inclinera successivement dans un sens et dans l'autre pour suivre les mouvements de la manivelle en dehors de la verticale, et le piston s'élèvera et s'abaissera alternativement dans le corps de

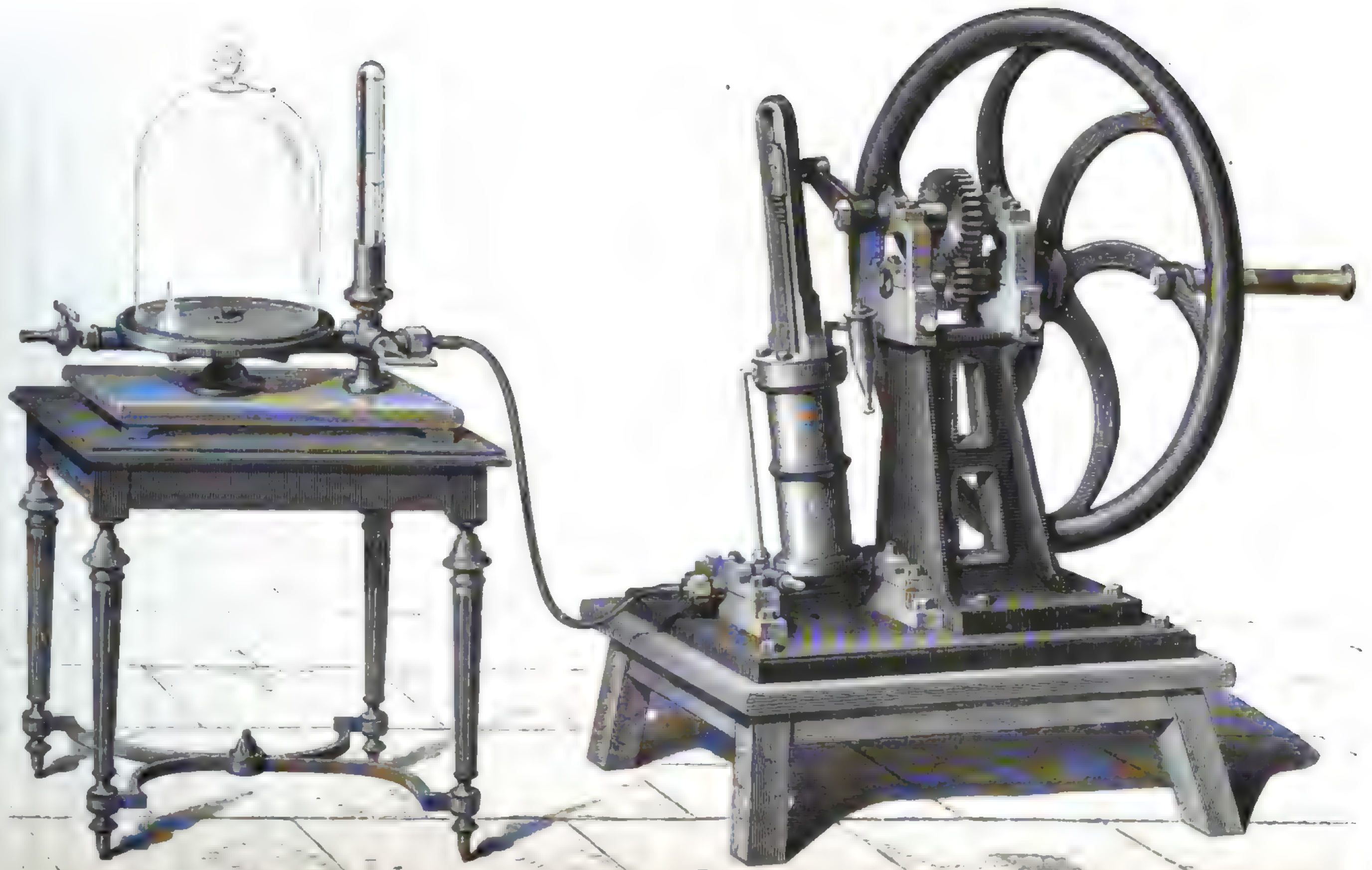


Fig. 140. — Machine de M. Bianchi.

pompe, dont la longueur doit être égale au diamètre de la circonférence décrite par le bouton de la manivelle.

135. Expériences diverses sur la machine pneumatique. — A l'époque de l'invention de la machine pneumatique, on a imaginé, pour montrer les effets du vide, diverses expériences dont quelques-unes sont devenues classiques et sont répétées ordinairement dans les cours de physique.

Crève-vessie. — On place sur la platine de la machine pneumatique un cylindre de verre ouvert aux deux bouts, et on ferme la partie supérieure à l'aide d'une peau de vessie fortement assujettie sur les bords. A mesure que le vide s'opère, on voit la vessie se creuser à l'intérieur par l'effet de la pression atmosphérique; finalement elle se déchire, et l'air faisant brusquement invasion dans la cloche, il se produit une détonation très-intense.

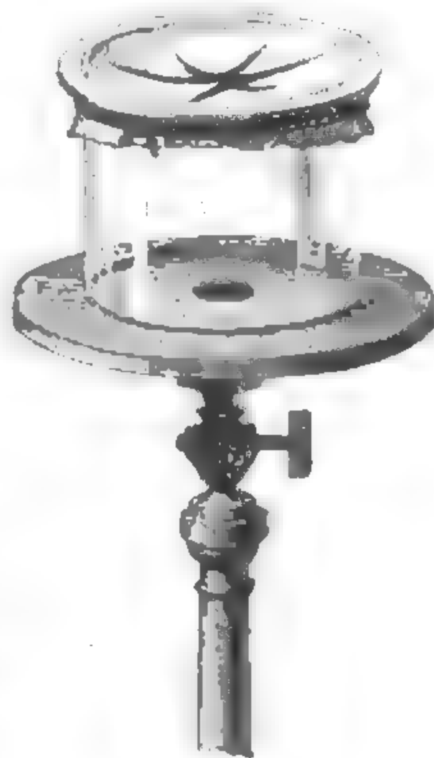


Fig. 141.
Crève-vessie.

Souvent la peau de vessie ne se brise pas spontanément malgré la forte pression extérieure, les molécules conservent leur équilibre de cohésion. Mais cet équilibre est pour ainsi dire instable, et il suffit de quelques petits chocs pour le détruire et déterminer la rupture de la membrane.

Hémisphères de Magdebourg. — On prend deux hémisphères (fig. 142) qui peuvent être exactement assujettis l'un sur l'autre; l'ajustement exact est d'ailleurs favorisé par l'interposition d'une bande circulaire de cuir lubrifiée avec du suif. On fait le vide dans l'appareil par l'intermédiaire du robinet que présente l'un des hémisphères, et quand le vide est fait, on reconnaît qu'on ne saurait séparer les deux parties de l'appareil qu'à l'aide d'une force considérable, d'autant plus énergique que les hémisphères ont un plus grand diamètre.

Cette résistance à la séparation est due à la pression que l'air extérieur exerce normalement sur chacun des points de la surface et qui n'est contre-balancée que par une pression intérieure excessivement faible. Pour nous rendre compte de l'effet résultant de ces

pressions diverses, concevons que la surface extérieure, au lieu d'être sphérique, soit formée d'une série de marches, c'est-à-dire de parties alternativement horizontales et verticales. Il est clair que les pressions exercées sur ces dernières n'influent en rien sur l'adhérence des hémisphères, les premières seules produisent cet effet et leur somme est évidemment égale à celle que l'atmosphère exerce sur la surface du cercle formant la base des hémisphères. Si cette surface est par exemple de 1 décimètre carré, chaque hémisphère est appliqué contre l'autre avec une force égale à 103 kilogrammes.

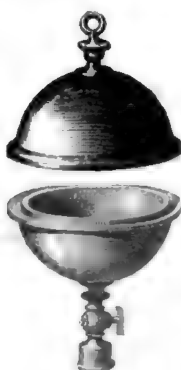


Fig. 142. Hémisphères de Magdebourg.

Fontaine dans le vide. — C'est une cloche en verre (fig. 143) dont la base est traversée par un tube muni d'un robinet qui permet de faire le vide dans l'appareil. Si, lorsque le vide est fait, on place la partie inférieure du tube dans un vase contenant de l'eau, et qu'on ouvre le robinet, le liquide pressé au dehors par l'atmosphère s'élance dans le tube et s'élève en une colonne jaillissante dans l'intérieur de la cloche. On fait quelquefois l'expérience d'une manière inverse. On place sous le récipient de la machine pneumatique une fiole partiellement remplie d'eau, et dont le bouchon est traversé par un tube ouvert aux deux bouts. A mesure que le



Fig. 143. — Fontaine dans le vide.

vide se fait, l'air de la fiole, par son excès de pression, agit sur le liquide et le fait jaillir au dehors.

Cloche à double baromètre. — On place sur la platine une cloche dont la partie supérieure présente deux ouvertures. A travers l'une d'elles passe un baromètre à siphon BC. Sur l'autre s'adapte un tube T qui s'élève d'abord, se recourbe ensuite et vient se terminer par le réservoir ouvert C' dans lequel se trouve du mercure. A l'origine de l'expérience, lorsque l'air de la cloche est à la pression extérieure, le mercure en C' s'élève au même niveau dans les deux branches, tandis que dans le baromètre à siphon le mercure monte dans le tube B à la hauteur qui mesure la pression atmosphérique. Si l'on vient à faire le vide, on voit le mercure descendre dans le baromètre B et monter dans le tube vertical qui communique avec C'. La marche des deux colonnes est d'ailleurs la même, elles s'élèvent et s'abaissent chacune de la même quantité à chaque coup de piston. Si on pouvait faire le vide exactement, le niveau du mercure serait le même dans les deux branches du baromètre BC, tandis que dans l'autre tube la hauteur du liquide au-dessus du niveau en C' mesurerait la pression atmosphérique. Comme il reste toujours un peu d'air dans la cloche, lequel a une certaine force élastique, il y a une petite différence de niveau dans le baromètre, et c'est cette différence qui manque à la hauteur de la colonne soulevée dans l'autre tube, pour qu'elle mesure exactement la pression extérieure.

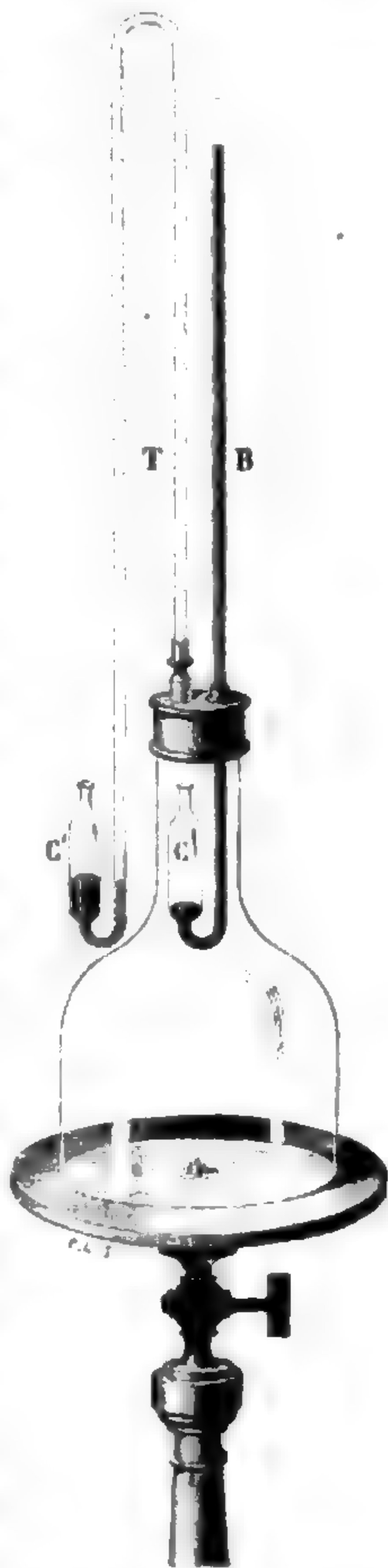


Fig. 144.—Cloche à double baromètre.

136. Limite d'action de la machine pneumatique.— Nous avons dit précédemment (132) que la machine pneumatique ne produit pas une raréfaction indéfinie de l'air, et qu'il arrive un moment où

son effet s'arrête : l'air du récipient possède alors une force élastique qui ne diminue plus. Si la machine est très-mal construite, cette force élastique peut être notable ; mais elle est toujours sensible, si parfaite que soit la construction. On peut dire qu'une machine du genre de celles que nous avons décrites est très-bonne, lorsqu'elle fait le vide à un demi-millimètre de mercure ; il est très-rare qu'on atteigne une limite inférieure.

Les causes de cette limite d'action de la machine sont diverses. La plus importante et la plus générale est, sans contredit, l'imperfection de l'ajustement des pièces de l'appareil. Il est impossible qu'il ne se fasse pas en différents points des rentrées d'air; à l'origine de l'expérience, ces rentrées sont peu de chose relativement à l'air que l'on extrait ; mais, à mesure que le vide se fait, ces rentrées se font plus facilement, précisément à cause de la faible pression intérieure, et il arrive un moment où elles équilibrent exactement l'air qui est expulsé par le jeu de la machine.

A cette cause générale se joignent des causes particulières dépendantes du mode même de construction. Ainsi par exemple, au moment où le piston commence son mouvement descendant, il faudrait qu'à l'instant même l'ouverture inférieure du canal fût bouchée. Il ne peut pas en être ainsi, et dans le court instant pendant lequel cette ouverture est libre, de l'air est refoulé dans le récipient. On a construit des machines dans lesquelles on obtient la fermeture automatique de l'extrémité du canal un peu avant le moment où le piston atteint le sommet de sa course. Malgré le caractère rationnel de cette modification, comme elle exige un mécanisme qui complique un peu l'appareil, elle n'est pas généralement usitée.

Une des circonstances auxquelles on attribue l'influence la plus fâcheuse, est ce que l'on appelle l'*espace nuisible*. On désigne ainsi l'espace qui, malgré tous les soins possibles, existe toujours entre le fond du corps de pompe et la partie inférieure du piston, lorsque celui-ci est à la partie inférieure de sa course. Il est clair qu'à ce moment cet espace renferme de l'air à la pression extérieure. Lorsqu'on soulève le piston, cet air se raréfie sans doute, mais il conserve néanmoins une certaine force élastique, et il est bien évident que lorsque l'air du récipient aura été

amené à cet état de raréfaction, la machine cessera de produire un effet utile.

Si v est le volume de l'espace nuisible, V le volume du corps de pompe, l'air, qui sous le volume v possède une tension H égale à celle de l'atmosphère, aura sans le volume V une pression égale à $H\frac{v}{V}$. C'est la limite d'action de la machine déduite de la considération de l'espace nuisible.

Enfin la cause peut-être la plus grave et la plus difficile à atteindre tient à la dissolution de l'air dans l'huile que l'on emploie pour lubrifier les pistons. Cette huile est versée à la partie supérieure du piston; mais pressée par l'air au moment de la raréfaction dans l'espace inférieur, elle se glisse entre le piston et le corps de pompe, et finit toujours par tomber en quantité plus ou moins grande à la base de ce dernier. Là elle absorbe de l'air qu'elle rend partiellement au moment où le piston s'élève, ce qui a pour résultat évident d'entraver le fonctionnement de la machine.

On a cherché à faire disparaître l'espace nuisible en employant une sorte de piston de mercure. Cette disposition a d'ailleurs l'avantage de produire un remplissage plus parfait, et par suite d'empêcher les rentrées. On peut aussi éviter dans ces machines l'emploi des huiles, et se mettre ainsi à l'abri des fâcheux effets dont nous venons de parler. Nous décrirons ici deux appareils fondés sur ce principe.

137. Machine de M. Kravogl. — Elle se compose d'un cylindre creux AB en verre, ayant à sa partie supérieure la forme d'un entonnoir, dans lequel se meut un piston d'acier bien poli C.

Ce piston est baigné par une couche de mercure de 1/2 millimètre d'épaisseur quand il est dans la position la plus base, mais de 2 centimètres environ quand il est dans la position la plus élevée, alors que sa partie supérieure remplit la cavité en forme d'entonnoir qui termine le corps de pompe. Un petit intervalle, occupé par le liquide, se trouve libre entre le corps de pompe et le piston, mais inférieurement celui-ci traverse une boîte à cuir très-soigneusement faite, de manière à produire une fermeture hermétique.

L'air arrive du récipient par le canal i; refoulé par le mercure, il est finalement expulsé dans l'entonnoir supérieur. Avec l'air passe



Fig. 145. — Machine de M. Kravogl.

une certaine quantité de mercure, qui est retenu par une soupape en acier c ajustée dans la partie intérieure la plus étroite de l'entonnoir. La soupape se soulève automatiquement lorsque la surface du mercure est à une distance de 1 centimètre 1/2 de l'entonnoir, et retombe dans sa position primitive lorsque le piston est au haut de sa course. Dans le mouvement descendant, et au moment où

le mercure se trouve de nouveau à 1 centimètre 1/2 de l'entonnoir, la soupape s'ouvre de nouveau pour laisser retomber le mercure, dont une partie seulement reste d'une manière permanente au-dessus de la soupape.

Les conséquences de cette disposition sont faciles à concevoir ; il n'y a pas d'espace nuisible, la présence du mercure au-dessus et autour du piston donne lieu à une fermeture très-complète et peu accessible à l'air extérieur ; la puissance de la machine peut donc être considérable si elle est bien exécutée.

Quand il en est ainsi, et que le mercure de l'appareil est bien sec, on peut faire le vide à 1/10 de millimètre près. L'état de sécheresse du mercure est fort important, car aux températures ordinaires la force élastique de la vapeur d'eau a une valeur très-sensible. Lorsque l'on veut utiliser toute la puissance de raréfaction de la machine, il convient d'établir, entre le vase où l'on veut faire le vide et le corps de pompe, un appareil dessiccateur.

La soupape *i* a une disposition particulière. Elle est de forme conique, pour que dans sa position la plus basse elle laisse passer l'air provenant du récipient. Le mouvement d'ascension a lieu de lui-même par la poussée du mercure qui la presse contre l'extrémité conique du canal, ce qui empêche d'ailleurs celui-ci d'être envahi par le liquide.

La figure représente une machine à deux corps analogue à la machine ordinaire. Indépendamment du pignon qui engrène avec les crémaillères des pistons, il y a un second pignon plus petit, qu'on n'a pas marqué sur la figure, et qui est destiné à produire le mouvement automatique des soupapes *c*. Toutes les parties de cette machine, robinets, soupapes, conduits, etc., doivent être en acier, afin d'éviter l'altération qui résulterait de l'action du mercure sur tout autre métal.

138. Machine de Geissler. — M. Geissler, constructeur de Berlin, a imaginé une machine à mercure dans laquelle la raréfaction s'obtient par la communication du récipient avec le vide barométrique. La figure 146 représente une machine analogue, construite, avec beaucoup de perfection d'ailleurs, par M. Alvergniat. Elle se compose d'un tube vertical, servant de tube barométrique, qui com-

munique inférieurement, par l'intermédiaire d'un long caoutchouc, avec un ballon formant la cuvette.

A la partie supérieure du tube se trouve un robinet à trois voies pouvant établir la communication, soit vers la gauche avec le récipient, soit vers la droite avec un entonnoir, précédé lui-même d'un robinet simple. Un autre robinet, placé vers la gauche, permet d'établir ou d'intercepter la communication avec le récipient. Ces robinets sont entièrement en verre. Voici comment se manœuvre l'instrument : les communications étant établies du côté de l'entonnoir, on élève le ballon servant de cuvette et on le place, ainsi que le montre la figure, à un niveau supérieur à celui du robinet de l'entonnoir. En vertu de l'équilibre dans les vases communicants, le mercure remplit le tube barométrique, la partie qui le rattache à l'entonnoir et une partie de l'entonnoir lui-même. Si on supprime alors la communication avec ce dernier et qu'on descende la cuvette, le vide barométrique se fait dans la partie supérieure de l'appareil.



Fig. 146. — Machine de M. Alvergniat.

On établit alors les communications du côté du récipient, l'air

se répand dans le vide barométrique, et abaisse un peu la colonne de mercure. On supprime alors la communication du côté du récipient, et on l'établit du côté de l'entonnoir, en laissant toutefois fermé le robinet simple de celui-ci. Si en ce moment on remet le ballon dans la position indiquée par la figure, l'air tend à s'échapper par l'entonnoir, et il est facile de lui donner issue. On a donc ainsi enlevé une portion de l'air du récipient, et l'appareil est dans la même position qu'à l'origine. C'est l'équivalent d'un coup de piston. Il suffira de recommencer la même série d'opérations pour faire graduellement le vide dans le récipient.

Cette machine ne renfermant d'autre organe mécanique que des robinets de verre, qu'on sait exécuter aujourd'hui avec beaucoup de perfection, est susceptible d'une grande puissance. Avec du mercure bien sec on obtient très-sûrement le vide à 1/10 de millimètre de mercure. Toutefois la manœuvre de la machine est peu commode, et elle serait vraiment fastidieuse si le récipient avait une capacité un peu considérable. Aussi on ne l'emploie directement que pour faire le vide dans de petits espaces; quand il s'agit d'espaces un peu grands, on commence par se servir de la machine ordinaire, et on n'utilise la machine à mercure que pour terminer l'opération.

139. Double épuisement. — Dans les deux machines à mercure qui viennent d'être décrites, il n'y a pas d'espace nuisible, le liquide expulsant complétement l'air du corps de pompe; ces machines sont d'ailleurs d'invention récente. Il y a fort longtemps que M. Babinet a fait connaître une disposition qui a pour résultat, non pas d'annuler l'espace nuisible, mais de faire le vide dans son intérieur. De cette façon, l'air que l'espace nuisible renferme étant plus raréfié, une nouvelle quantité de l'air du récipient sera aspirée au dehors.

Pour atteindre ce but, à un certain moment, lorsque la machine, dans sa disposition ordinaire, cesse de fonctionner, on supprime la communication de l'un des corps de pompe avec le récipient et on le fait servir à faire le vide dans l'autre. Pour cela la clef d'un robinet placé au point de jonction des deux canaux de communication est percée (fig. 147) d'un canal en forme de T, le point

d'intersection des deux branches étant en communication continue avec le récipient. Dans un autre plan que celui du T se trouve un anal *mn*, qui par l'intermédiaire du tube *l* peut faire communiquer le corps de pompe B avec le canal de communication du corps de pompe A. On voit d'après cela que si la clef du robinet est placée dans la position de la première figure, les deux corps de pompe communiquent avec le récipient et les choses se passent à la manière ordinaire. Mais si, tournant d'un quart de révolution, on place la clef dans la position de la seconde figure, le corps de pompe B communique seul avec le récipient, tandis que le vide est fait dans son intérieur par le corps de pompe A.

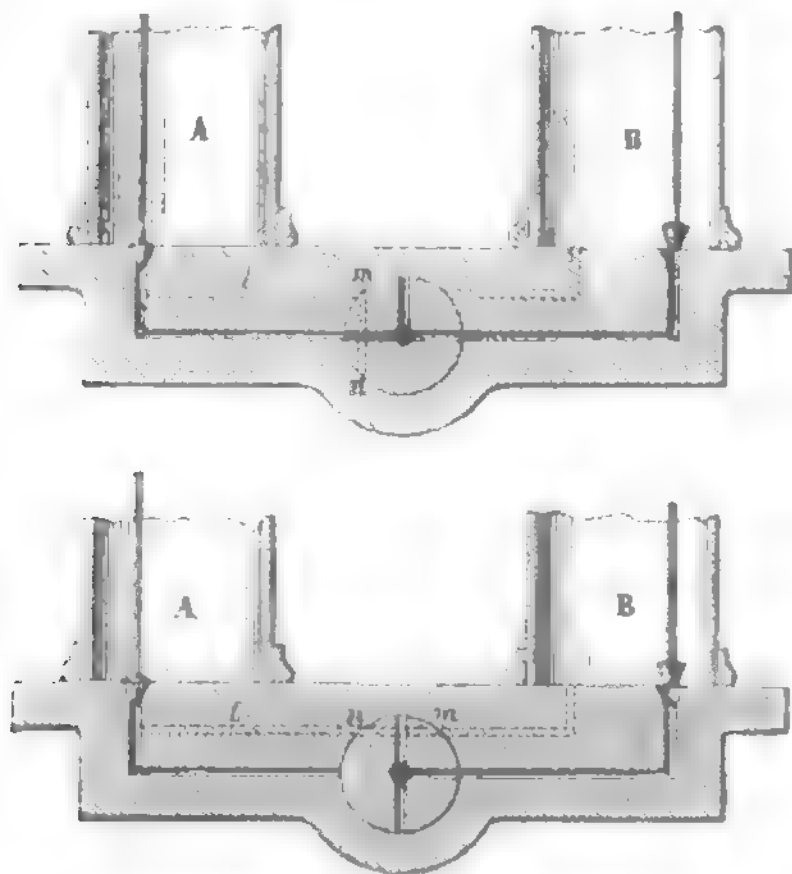


Fig. 147. — Dispositif Babinet.

On peut aisément préciser l'influence du double épuisement. Supposons que la machine ne donne plus rien dans la marche ordinaire, c'est que l'air du récipient a atteint une force élastique à peu près égale à $H\frac{v}{V}$ (136). A ce moment on place la clef dans la deuxième position. Au moment où le piston B descend, le piston A s'élève et l'air de l'espace nuisible B se raréfie dans A. Quand commencera le mouvement inverse, toute issue sera fermée à l'air qui a passé dans A, et ce sera par conséquent l'air déjà raréfié de B qui, se raréfiant de nouveau, appellera une nouvelle portion de l'air du récipient. Cet air sera refoulé ensuite dans A, où il sera comprimé par le mouvement descendant du piston et pourra s'échapper à l'extérieur.

Ce double épuisement cessera de fonctionner lui-même lorsqu'il ne passera plus d'air du corps de pompe B dans le corps de pompe A. Or, lorsque le piston est soulevé dans ce dernier, la force

élastique de l'air qui était contenu dans son espace nuisible est égale à $H\frac{v}{V}$, car la dernière fois que la soupape s'est ouverte, l'espace nuisible a été mis en communication avec l'atmosphère. D'autre part, lorsque le piston de B est en haut de sa course, la force élastique de l'air est la même que celle du récipient. Désignons-la par x. Au moment où le piston va descendre, nous pourrons considérer que l'air se réduira à l'espace nuisible et à la portion des canaux qui sont en communication avec lui. Désignons-en le volume par l. Sa force élastique s'accroît par conséquent et devient $x\frac{V+l}{v+l}$. Si la machine cesse de fonctionner, c'est que cette force élastique ne surpasse pas celle qui règne dans le corps de pompe B. On a donc à la limite d'action de l'appareil

$$x\frac{V+l}{v+l}=H\frac{v}{V},$$

d'où

$$x=H\cdot\frac{v}{V}\cdot\frac{v+l}{V+l}.$$

140. Machine à piston libre. — Nous indiquerons encore une machine construite par M. Deleuil et fondée sur un principe intéressant. On sait que les gaz possèdent pour les solides une adhérence marquée, de sorte qu'un corps plongé dans l'atmosphère doit être considéré comme recouvert d'une pellicule d'air qui forme une enveloppe pour ainsi dire permanente. A raison de cette circonstance, les gaz éprouvent la plus grande difficulté à se mouvoir dans des espaces très-étroits. C'est sur ces faits que repose la construction de la machine dite à piston libre.

Le piston entièrement métallique P (fig. 149) est d'une longueur assez considérable, et présente sur sa surface extérieure des rainures parallèles très-rapprochées; il ne touche nulle part le corps de pompe, il y a entre les deux une distance très-petite d'ailleurs, 1/50 de millimètre environ. Ce piston libre est ainsi entouré d'un bourrelet gazeux qui en forme l'unique garniture, et qui constitue une occlusion suffisante pour permettre à la machine d'avoir son fonctionnement ordinaire, malgré la communication permanente

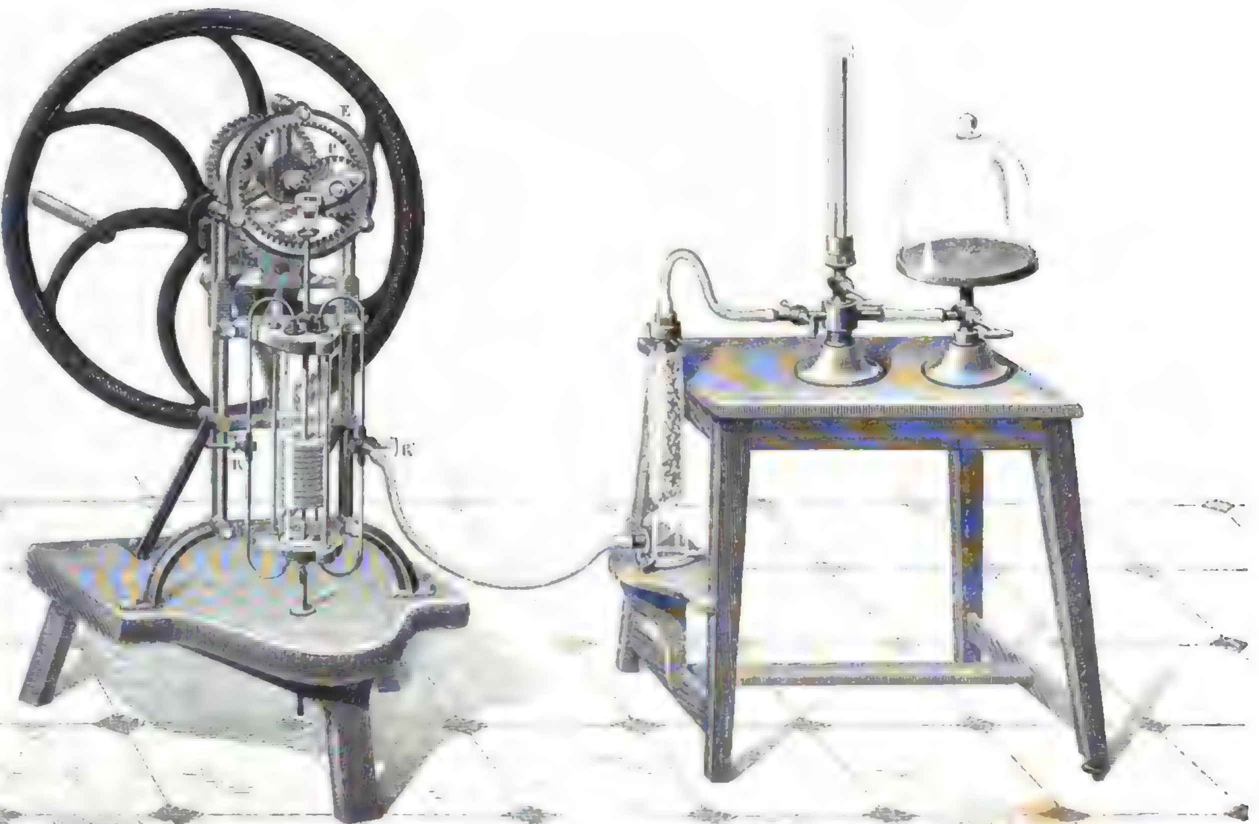


Fig. 148. — Machine de M. Deleuil.

entre la partie supérieure et la partie inférieure du piston. Le vide qu'on peut obtenir à l'aide de cette machine est comparable à celui qu'on obtient avec les modèles ordinaires, et on y trouve le très-grand avantage de la suppression des huiles, de la diminution du frottement et de l'usure, ce qui empêche d'ailleurs l'échauffement si souvent nuisible dans ces appareils. La machine est à un seul corps de pompe et à double effet comme celle de M. Bianchi. Les deux ouvertures S et S' sont les ouvertures d'aspiration; elles sont alternativement fermées et ouvertes par les bouchons coniques formant les extrémités de la tige T qui traverse le piston à frottement dur. Elles communiquent avec des tubes qui viennent se réunir en R', où se trouve disposé le tube qui se rend au récipient. A et A' sont les soupapes d'expulsion de l'air, qui s'échappe par des tubes venant se réunir en R. Le mouvement alternatif du piston s'obtient à l'aide de l'engrenage dit de Delahire. Cet engrenage est fondé sur la propriété suivante : *Lorsqu'une circonférence de cercle roule sans glisser dans l'intérieur d'une circonférence de rayon double, un quelconque de ses points décrit un diamètre de la circonférence fixe.* Pour utiliser cette propriété, on articule la tige du piston à l'extrémité (fig. 148) d'une pièce de métal appliquée exactement sur la longueur du pignon P. Celui-ci, mis en mouvement par un volant et un engrenage convenables, engrène avec la denture intérieure de la roue fixe E. Le piston décrira donc librement et sans aucun effort latéral une ligne verticale avec une amplitude de mouvement égale au diamètre de la roue fixe.

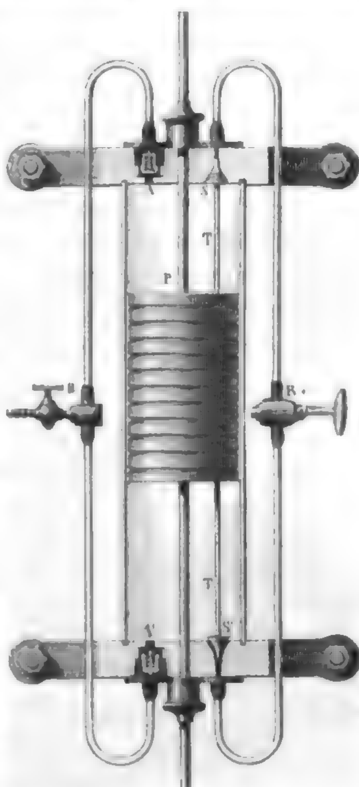


Fig. 149. — Corps de pompe et piston de la machine de M. Deleuil.

141. Machine de compression. — On peut voir clairement par la description de la machine pneumatique que, si on réunissait les ouvertures correspondantes aux soupapes d'expulsion par un tube aboutissant à un réservoir, l'air enlevé par la machine se comprimerait dans ce dernier. Cette réunion se trouve faite dans la machine qui vient d'être décrite. Si par conséquent on fait communiquer R' avec l'air extérieur, cet air continuellement aspiré en ce point sera refoulé d'une manière continue dans le réservoir mis en rapport avec R. La machine fonctionnera donc alors comme machine de compression. On voit donc que la machine de compression est identique au fond avec la machine pneumatique; la seule différence consiste en ce que le récipient est du côté des soupapes d'expulsion, au lieu de se trouver du côté des soupapes d'aspiration; c'est pour ainsi dire la machine pneumatique retournée.

Ce caractère est très-sensible dans la construction d'une petite pompe fréquemment employée dans les cabinets de physique, et que représente notre figure 150.

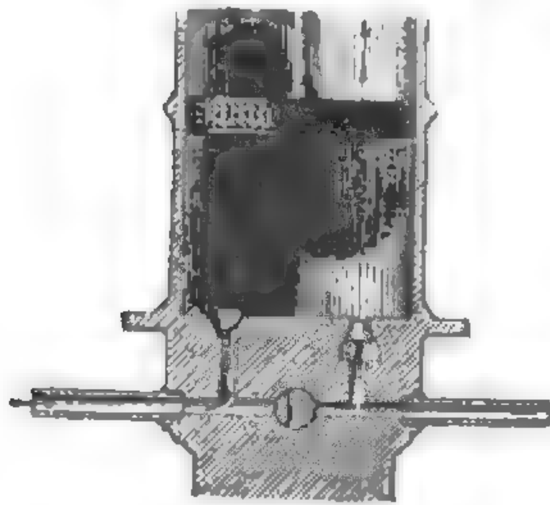


Fig. 150.

Il y a à la base du corps de pompe, et en communication avec deux réservoirs distincts, une soupape d'aspiration à gauche et une soupape d'expulsion ou de refoulement à droite.

Si donc on soulève le piston, la raréfaction se fait dans le réservoir de gauche; si on l'abaisse, on comprime le gaz dans le réservoir de droite.

142. Pompe de compression. — La figure 151 représente une pompe de compression d'un usage assez fréquent. A la partie inférieure du corps de pompe se trouve une soupape *b* s'ouvrant de haut en bas; sur un tube latéral est une soupape d'aspiration s'ouvrant de dehors en dedans. La figure montre la disposition de ces soupapes. Ce sont des bouchons coniques en métal, munis d'une tige qui passe à travers une petite plaque percée d'un trou située à l'arrière, disposition qui a pour effet d'empêcher la soupape de se renverser. Un petit ressort à boudin entoure la tige et maintient la soupape contre l'ouverture. Il suit de là que si on visse la partie

inférieure de la pompe sur un réservoir, à chaque mouvement ascendant du piston le corps de pompe se remplira d'air qui s'introduira par la soupape *a*; à chaque mouvement descendant cet air sera refoulé dans le réservoir.

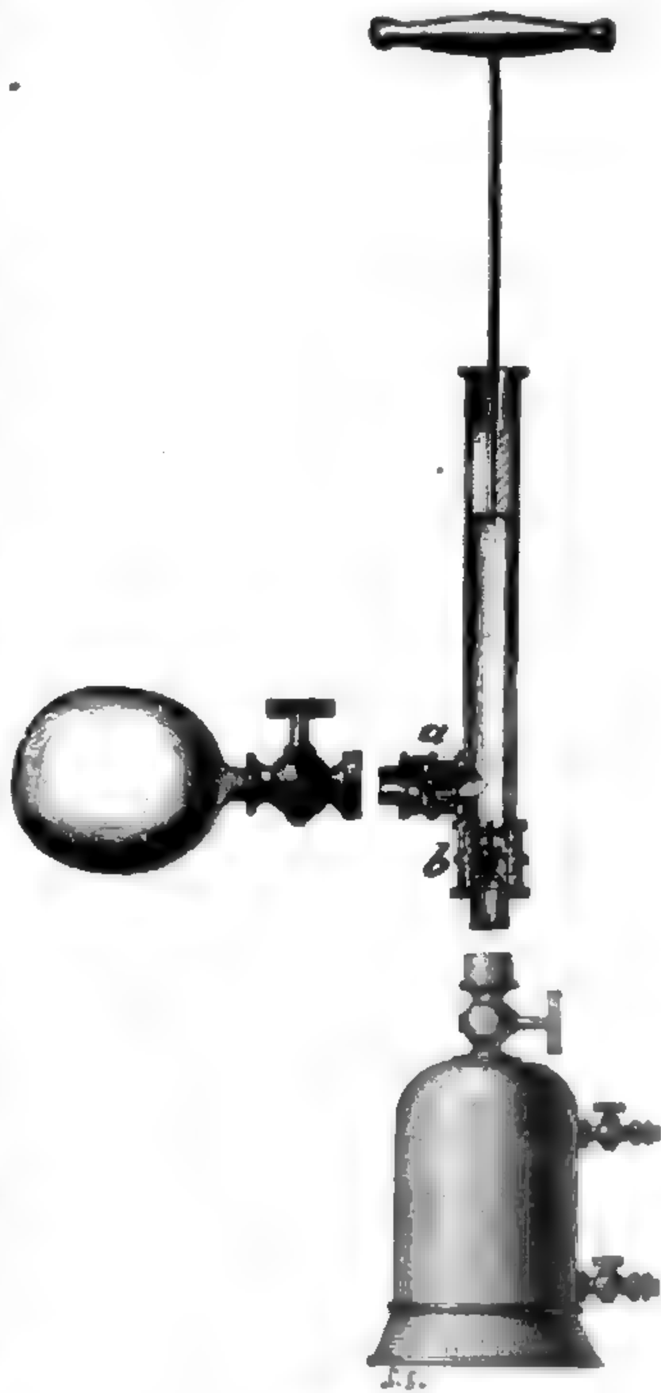


Fig. 151. — Pompe de compression.

En mettant le tuyau latéral en communication avec une vessie ou un gazomètre contenant un gaz quelconque, celui-ci sera comprimé dans le réservoir.

143. Calcul de l'effet de la machine. — Il est facile de calculer quelle est la force élastique de l'air comprimé après un certain nombre de coups de piston. Soit en effet v le volume du corps de pompe et V le volume du réservoir; à chaque coup de piston on fait passer dans le réservoir un volume d'air égal à celui du corps de pompe, ce qui donne après n coups un volume égal à nv. L'air que renferme le réservoir occupait donc sous la pression de l'atmosphère H un volume égal à $V+nv$; lorsque ce volume sera réduit à V, la pression sera, d'après la loi de Mariotte,

$$H\frac{V+nv}{V}.$$

On voit que théoriquement cette pression peut augmenter indéfiniment et qu'il n'y a d'autres limites que celles quitiennent à la résistance des appareils et à la grandeur de la force motrice dont on dispose.

Toutefois l'espace que le piston laisse au-dessous de lui, quand il est au bas de sa course, analogue à l'espace nuisible de la machine pneumatique, donne lieu à une limite d'action de la machine.

En effet, quand l'air du corps de pompe est amené du volume

v du corps de pompe au volume v' de l'espace nuisible, sa pression devient $H \frac{v}{v'}$, et pour que cet air passe dans le réservoir, il faut évidemment que la pression qui règne dans celui-ci soit moindre. C'est donc la limite de la compression qui peut être obtenue.

Il faut néanmoins distinguer avec soin l'influence de l'espace nuisible dans la machine pneumatique et dans la machine de compression. Dans le premier de ces appareils on se propose de raréfier l'air *autant que possible*, et par conséquent l'espace nuisible intervient toujours comme une imperfection qui oppose un obstacle déterminé à l'action parfaite de la machine.

La machine de compression, au contraire, a pour objet de comprimer l'air, non pas indéfiniment, mais jusqu'à une limite donnée. Ainsi par exemple, telle pompe est destinée à comprimer l'air à 5 atmosphères, telle autre à 10, etc. Dans ces différents cas le constructeur s'arrange pour que cette limite soit atteinte, et dès lors l'espace nuisible quel qu'il soit n'intervient nullement dans l'effet réel et définitif.

144. Compression de l'air dans l'industrie. — L'air comprimé constitue une force motrice dont les applications, déjà fort diverses, sont susceptibles de beaucoup d'extension.

Pour obtenir un degré de compression suffisant, on accouple de différentes façons des pompes analogues à celles que nous avons décrites. La figure 152 représente le système employé par M. Regnault dans ses recherches sur la loi de Mariotte et les forces élastiques de la vapeur. Il se compose de trois pompes dont les tiges sont articulées à trois portions coudées d'un axe, par l'intermédiaire de trois bielles ; l'axe, muni d'un volant, est mis en mouvement à l'aide d'une ou de deux manivelles. Les diverses soupapes d'aspiration communiquent avec un réservoir unique en rapport avec l'air extérieur, et le gaz refoulé se rend dans un autre réservoir qui est mis en communication avec les appareils particuliers sur lesquels on expérimente.

La chaleur dégagée par la compression de l'air constitue un obstacle très-grave au fonctionnement des machines : elle altère les garnitures, et produit souvent entre les pistons et les corps de pompe un grippement difficile à surmonter. Dans quelques ma-

chines industrielles, on atténue cet inconvénient en noyant les soupapes inférieures, disposition qui a aussi l'avantage de faire disparaître l'espace nuisible. On peut obtenir ainsi aisément de l'air à une pression de 40 atmosphères. On comprime du reste l'air

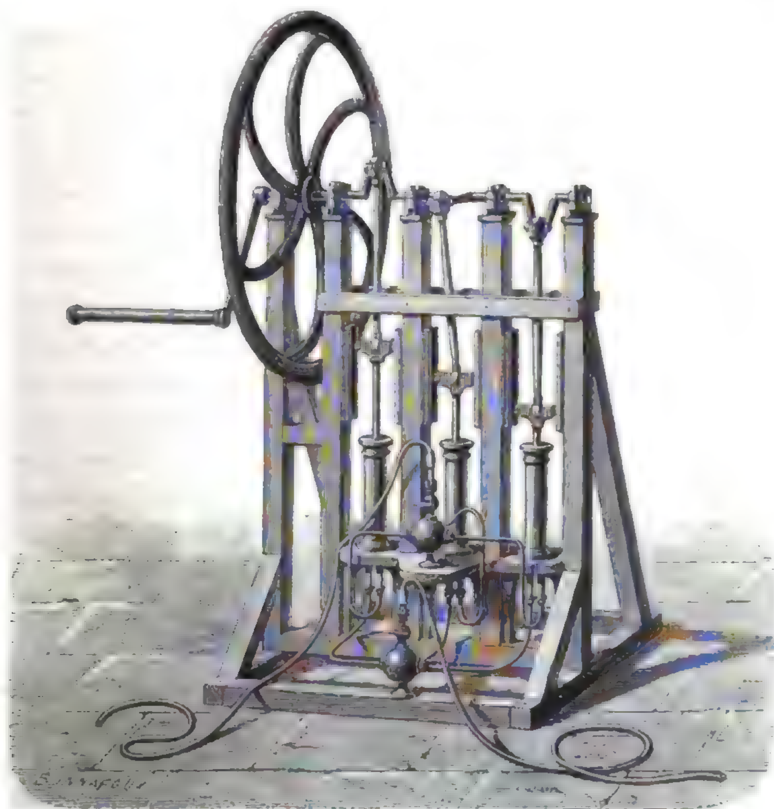


Fig. 152. — Pompes accouplées.

directement sans employer les pompes, lorsque l'on peut utiliser une hauteur d'eau convenable. Il suffit de faire arriver le liquide par un tube jusqu'au fond d'un réservoir contenant de l'air ; celui-ci se comprime jusqu'à ce que sa pression surpasse celle de l'atmosphère d'une quantité égale à la hauteur de la chute d'eau dont on dispose. C'est par un mécanisme de ce genre que l'on obtient l'air comprimé qui sert à faire mouvoir les machines perforatrices employées dans le percement du mont Cenis.

145. Applications de la machine pneumatique et de l'air comprimé. — En dehors des usages de la machine pneumatique et de la machine de compression qui sont propres aux laboratoires, l'industrie utilise diversement ces deux appareils.

La machine pneumatique est employée dans les raffineries pour faciliter et rendre plus rapide l'évaporation des sirops. Les pompes de compression sont employées dans les fabriques d'eau de Seltz pour refouler et comprimer l'acide carbonique dans les réservoirs contenant l'eau qui doit dissoudre le gaz. Le petit appareil décrit plus haut (fig. 151) pourrait servir à exécuter cette opération; il suffirait de remplir d'acide carbonique la vessie latérale et de mettre une certaine quantité d'eau dans le réservoir inférieur. C'est à l'aide de l'air comprimé qu'on a depuis un certain nombre d'années établi les fondations de ponts dans des rivières où la nature sablonneuse du sol exigeait un travail très-profond. De grands tubes dans lesquels on comprime l'air sont descendus graduellement dans la rivière, l'air par sa pression expulse l'eau, et des ouvriers pénétrant dans l'appareil, à l'aide d'une sorte d'écluse, peuvent y travailler à sec. C'est ainsi en particulier qu'ont été établies les fondations du pont de Kehl et du pont du chemin de fer à Bordeaux.

C'est par la compression de l'air que l'administration des télégraphes à Paris fait parvenir d'une poste à l'autre les dépêches dont la transmission électrique demanderait un temps très-considérable et incompatible avec les exigences du service. Les deux stations sont réunies par un tube en cuivre; à chacune d'elles se trouve un réservoir dans lequel on comprime de l'air, en faisant arriver les eaux de la ville, qui ont, suivant les points, une charge de 8 à 20 mètres. L'air comprimé est lancé dans le tube en arrière d'une sorte de train formé d'un piston, précédé d'une série de boîtes contenant les dépêches; la vitesse de marche est en moyenne de 500 mètres par minute.

Ajoutons que dans les usines les grandes machines soufflantes qui amènent l'air dans les foyers sont de véritables machines de compression.

CHAPITRE XVI.

POUSSÉE DE L'AIR.

146. Baroscope. — L'air atmosphérique exerce, ainsi que nous l'avons indiqué déjà (101), une poussée sur les corps plongés dans son intérieur. Cette poussée, d'après le principe d'Archimède, applicable aux gaz aussi bien qu'aux liquides, est égale au poids de l'air déplacé. Il suit de là que le poids d'un corps dans l'air n'est pas son poids réel, il en diffère d'une quantité égale à la poussée. Le baroscope est fondé sur cette remarque.

C'est une sorte de balance dont le fléau supporte à ses extrémités deux boules d'un diamètre très-différent et qui se font équilibre dans l'air. Si l'on place l'appareil sous le récipient de la machine pneumatique, on voit, dès les premiers coups de piston, le fléau s'incliner du côté de la grosse sphère, et de plus en plus à mesure que l'air se raréfie davantage. En effet, la quantité de gaz qu'on enlève donnait lieu pour sa part à une poussée qui n'existe plus. Le poids de chaque boule se trouve donc accru de celui d'un volume égal d'air ayant pour densité la différence entre la densité initiale et la densité actuelle; cet accroissement est donc plus grand pour

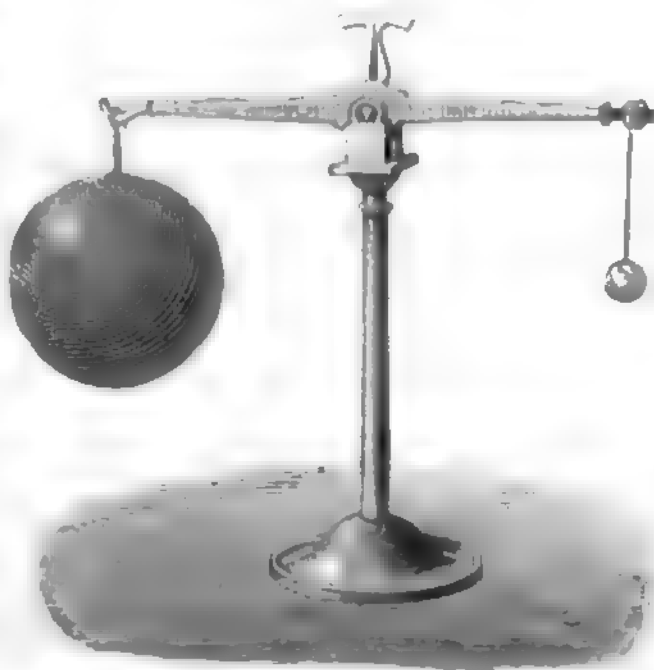


Fig. 153. — Baroscope.

la sphère dont le diamètre est le plus considérable, ce qui explique le phénomène observé.

Si, lorsqu'on a fait le vide, on laissait rentrer sous le récipient de l'acide carbonique, gaz plus dense que l'air, il en résulterait un accroissement de poussée plus considérable pour la grosse sphère que pour la petite et le fléau s'inclinerait du côté de cette dernière.

147. Aérostats. — Si l'on imagine un corps dont le poids soit plus faible que celui du même volume d'air, ce corps s'élèvera dans l'atmosphère.

Si, par exemple, on remplit des bulles de savon avec du gaz hydrogène, et qu'on les détache par un mouvement brusque de

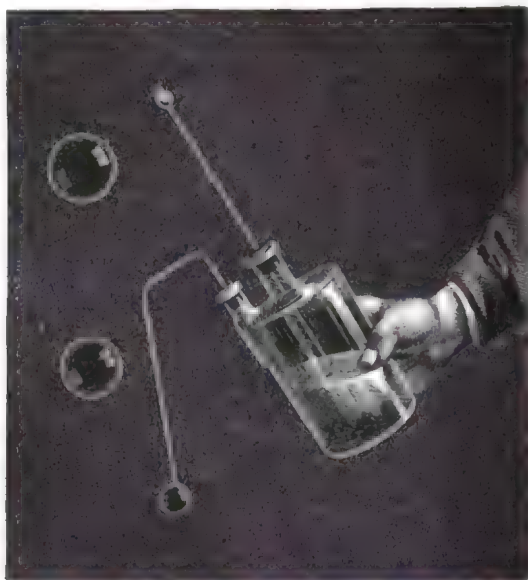


Fig. 154. — Ascension des bulles de savon remplies d'hydrogène.

l'extrémité du tube où elles se forment, on les verra, si leur volume est suffisamment grand, s'élever dans l'atmosphère. Cette curieuse expérience est due au physicien Cavallo, qui la fit connaître en 1782 [1].

1. La première idée des aérostats doit être attribuée au père François Lana, qui, vers 1670, proposa de faire le vide dans des ballons de cuivre assez grands et assez minces pour que leur poids fût inférieur à celui de l'air déplacé. L'expérience ne fut point tentée et elle n'eût certainement pas réussi, car la pression atmosphérique aurait écrasé les sphères. Mais le principe théorique en est parfaitement bien saisi par l'auteur, qui fait un calcul exact de la force ascensionnelle.

Sur ce même principe sont fondés les aérostats, qui se réduisent essentiellement à une enveloppe renfermant un gaz plus léger que l'air. A raison de cette différence de densité, on pourra toujours prendre un volume assez grand pour que le poids de l'enveloppe et du gaz contenu soit inférieur au poids de l'air déplacé; dans ce cas, l'appareil s'élèvera.

La découverte des aérostats est due aux frères Joseph et Étienne Montgolfier. Les premiers appareils qu'ils construisirent étaient des espèces de globes de papier ou de papier couvert de toile, dont ils dilataient l'air intérieur par l'action de la chaleur. Il est curieux de remarquer que dans leurs premiers essais ils eurent recours à

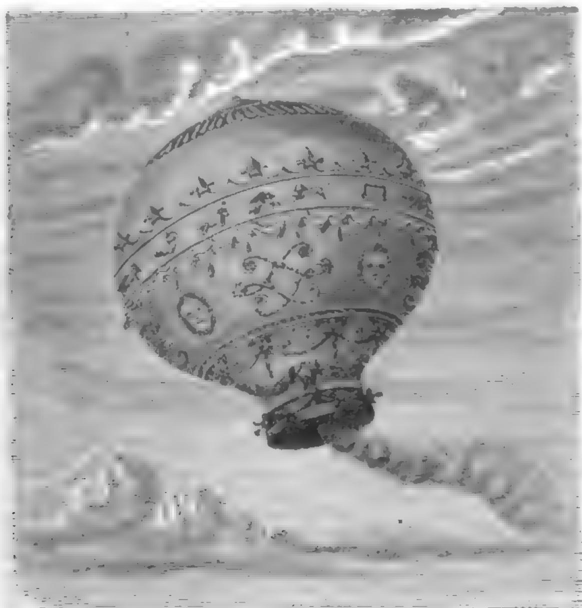


Fig. 155. — Montgolfière de Pilatre de Rozier et d'Arlandes.

l'hydrogène, et ils constatèrent que des globes de papier remplis de ce gaz s'élevaient. Mais le gaz traversant facilement le papier, l'ascension était de courte durée; ils renoncèrent donc à l'emploi de l'hydrogène et ne se servirent plus que de l'air chaud.

On donne particulièrement le nom de montgolfières aux ballons à air chaud. Elles se composent ordinairement d'une enveloppe munie inférieurement d'une large ouverture; au-dessous de cette

ouverture on suspend un réchaud, dans lequel on place des matières combustibles au moment même de l'ascension, ce qui entretient pendant quelque temps la force ascensionnelle de l'appareil.

La première expérience en grand de l'ascension d'une montgolfière fut faite à Annonay le 5 juin 1783. Le 21 octobre de la même année, Pilatre de Rozier et le marquis d'Arlandes exécutèrent le premier voyage aérien avec une montgolfière que représente notre figure.

Le physicien Charles proposa de revenir à l'emploi du gaz hydrogène, en prenant une enveloppe suffisamment imperméable. C'est ordinairement ou du taffetas verni sur les deux faces, ou la réunion de deux feuilles de taffetas entre lesquelles on interpose une lame de caoutchouc. Aujourd'hui on se sert assez fréquemment du gaz de l'éclairage, à cause de la facilité qu'on a de se le procurer et de son prix moins élevé.

148. Force ascensionnelle. — On appelle force ascensionnelle la différence entre le poids de l'aérostat et celui de l'air déplacé. On peut facilement comparer les trois méthodes de gonflement, au point de vue de la force ascensionnelle qu'elles produisent. En effet :

Un mètre cube d'air pèse.	1,300gr.
Un mètre cube d'hydrogène.	89
Un mètre cube de gaz de l'éclairage environ. . . .	750
Un mètre cube d'air chauffé à 200°.	800

On voit donc que la force ascensionnelle par mètre cube est 1,210 grammes pour l'hydrogène, 550 grammes pour le gaz de l'éclairage, 500 grammes pour l'air chaud.

Si par exemple on évalue approximativement le poids total à emporter à 1,500 kilogrammes, il faudra, pour obtenir cette force ascensionnelle, un ballon de gaz hydrogène d'un volume égal à $\frac{1500}{1210} = 1239$ mètres cubes. Avec le gaz de l'éclairage le volume nécessaire serait $\frac{1500}{550} = 2727$ mètres cubes.

La nacelle dans laquelle prennent place les aéronautes est ordinairement en osier ou en fanons de baleine. Elle est retenue

par des cordes qui viennent s'attacher à un filet, occupant tout l'hémisphère supérieur de l'aérostat, de manière que la charge soit répartie aussi uniformément que possible. Le ballon se termine inférieurement par une sorte de col allongé s'ouvrant librement dans l'air. A la partie supérieure et dans l'intérieur est une autre ouverture que ferme une soupape pressée par un ressort. Une corde fixée à la soupape traverse l'intérieur du ballon et vient pendre au-dessus de la nacelle, à la portée de la main de l'aéronaute.



Fig. 156. — Aérostat avec sa nacelle et un parachute.

Lorsque l'on veut descendre, on ouvre la soupape pendant quelques instants. Du gaz sort de l'appareil si le gonflement est suffisant, ou de l'air pénètre dans son intérieur; de toute façon la force ascensionnelle diminue. Il est important d'emporter quelques sacs de sable servant de lest, que l'on vide graduellement quand on veut s'élever ou modérer une descente trop rapide. Notre figure représente un appareil appelé parachute, à l'aide duquel les aéronautes effectuent quelquefois leur descente. C'est une sorte de grand parapluie percé d'une ouverture à son sommet et du pourtour duquel partent des cordes qui viennent aboutir à une petite nacelle. Au moment où l'appareil est abandonné à lui-même, il se déploie et la résistance de l'air, agissant sur une grande surface, modère la vitesse de chute. L'ouverture placée à la partie supérieure est fort importante, elle permet un écoulement régulier de l'air qui, sans cela,

s'échapperait de temps en temps par la partie inférieure du parachute en imprimant à celui-ci des mouvements d'oscillation qui pourraient être fatals à l'aéronaute.

Une précaution très-importante à prendre est de ne pas gonfler complétement l'aérostat au moment du départ. En effet, la pression atmosphérique diminuant à mesure qu'on s'élève, l'expansibilité du gaz intérieur a un effet de plus en plus marqué, comme dans l'expérience indiquée (16), et il pourrait en résulter la rupture de l'enveloppe. Il suit de cette pratique qu'à mesure que le ballon s'élève, son volume augmente; mais jusqu'à ce qu'il soit gonflé complétement, la force ascensionnelle reste constante. En effet, supposons que la pression atmosphérique soit devenue deux fois plus faible, le volume de l'aérostat a doublé : il déplace donc un volume d'air double; mais la densité de cet air étant deux fois moindre, la poussée conserve la même valeur. Cette conclusion n'est pas toutefois bien rigoureuse, parce qu'une partie des pièces de l'aérostat, la nacelle, les cordes, etc., ont un volume invariable; elles déplacent de l'air d'une densité décroissante et par conséquent la force ascensionnelle est décroissante aussi. Ce décroissement de force ascensionnelle se produit nécessairement d'ailleurs à partir du moment où le ballon est complétement gonflé. L'appareil se trouve alors soumis à une force graduellement décroissante; il finit par atteindre une couche dont le poids est égal au sien sous le même volume. En vertu de la vitesse acquise, il dépasse cette couche et finit par s'y fixer après un certain nombre d'oscillations.

149. Théorie de l'aérostat. — Il existe entre la pression qui règne dans cette couche d'équilibre, le rayon de l'aérostat et le poids des diverses parties du système, une relation que l'on peut établir très-simplement, si l'on néglige les variations de température, et qui peut servir de guide dans la construction de l'appareil. Si V est le volume de l'aérostat, le poids de l'air déplacé est

$$V.\ 1{,}293\,\frac{h}{H},$$

h étant la pression dans la couche d'équilibre et H au niveau du sol. Appelons p et v le poids et le volume des diverses parties du

système, δ la densité du gaz intérieur, on aura comme équation d'équilibre

$$(V+v)\,1{,}293\,\frac{h}{H} = V\,.\,\delta\,\frac{h}{H} + p.$$

Dans cette équation, p et v renferment le poids et le volume de l'étoffe dont est formé l'aérostat et du filet; ces quantités dépendent par conséquent du rayon de l'appareil et par suite de V. L'équation est donc en réalité assez compliquée, mais on la résoudra approximativement par les méthodes ordinaires et on en déduira le rayon qui est nécessaire pour atteindre une couche dans laquelle règne une pression donnée. Or avec la formule de Laplace on peut trouver à quelle hauteur se trouve cette couche; on peut donc, au moins d'une manière approchée, estimer *à priori* le rayon qu'il convient de donner à un aérostat pour pouvoir atteindre une hauteur determinée.

Le poids que l'on emporte est toutefois supérieur à celui qui entre dans l'équation; cela tient à ce qu'on ne laisse pas au moment du départ à l'état effectif toute la force ascensionnelle dont on a besoin : on part avec une force très-faible et à mesure qu'on s'élève, on jette successivement le lest supplémentaire.

150. Influence de l'air sur le poids des corps. — La poussée de l'air altère l'exactitude des poids que l'on obtient, même avec une balance parfaitement juste. En effet, les poids marqués dont on se sert pour faire les pesées n'ont réellement leur poids nominal que dans le vide. Ainsi un poids marqué 100 grammes pèse 100 grammes dans le vide; dans l'air il pèse moins par conséquent. D'ailleurs les corps à peser subissent de la part de l'air une action analogue et variable suivant leur volume; il ne saurait donc y avoir généralement égalité entre les poids réels des corps qui se font équilibre. Quand on connaît la densité et des poids marqués et des corps à peser, on peut facilement déduire du poids apparent de ces derniers leur poids réel, c'est-à-dire celui que l'on obtiendrait dans le vide.

Soit x le poids réel d'un corps qui fait équilibre à un poids marqué P grammes.

Le poids apparent du corps est $x - \frac{x}{D}\alpha = x\left(1 - \frac{\alpha}{D}\right)$, D dési-

gnant sa densité et α celle de l'air. Le poids marqué pesant P grammes dans le vide, pèse dans l'air $P - \frac{P}{M}\alpha = P\left(1 - \frac{\alpha}{M}\right)$, M désignant la densité de la matière qui le forme. Ce sont ces deux poids apparents qui se font équilibre dans l'air, on a donc l'égalité

$$x\left(1 - \frac{\alpha}{D}\right) = P\left(1 - \frac{\alpha}{M}\right),$$

d'où

$$x = P\frac{1 - \frac{\alpha}{M}}{1 - \frac{\alpha}{D}}.$$

Soit, par exemple, un morceau de soufre dont on a trouvé le poids égal à 100 grammes, les poids marqués étant en cuivre dont la densité est 8,8. La densité du soufre est 2. On a, en appliquant la formule,

$$x = 100\frac{1 - \frac{1}{770.\,8{,}8}}{1 - \frac{1}{770.2}} = 100^{gr},05.$$

On voit que cette influence n'est pas négligeable. Elle varie d'ailleurs de sens comme le montre la formule, suivant les valeurs comparatives de D et de M. Lorsque la densité du corps à peser est plus petite que celle des poids marqués, le poids réel est plus grand que le poids apparent; c'est le contraire qui a lieu dans le cas inverse. Si le corps à peser était de même nature que les poids marqués, il y aurait égalité entre les deux.

On remarquera que si, au lieu de chercher le poids absolu d'un corps, on cherche le rapport des poids de deux corps, il n'y a pas à s'occuper de l'action de la poussée sur les poids marqués, parce qu'en faisant le quotient, le facteur correctif, qui a la même valeur pour l'un et pour l'autre, disparaîtra.

CHAPITRE XVII.

DES POMPES.

151. Les pompes sont des appareils destinés à élever l'eau. Elles sont fort anciennement connues, et on en attribue assez généralement l'invention à Ctésibius, maître du célèbre Héron d'Alexandrie. Jusqu'à l'époque de Galilée, la théorie de ces instruments a été complétement ignorée; c'est seulement après que la notion du poids et de la pression de l'air a été établie dans la science par l'expérience de Torricelli, que l'on a compris le mécanisme de l'ascension de l'eau dans ces appareils. La théorie de l'aspiration de l'eau dans les pompes se rattache donc à l'inauguration de la méthode expérimentale par Galilée, et au grand mouvement scientifique qui en fut la conséquence.

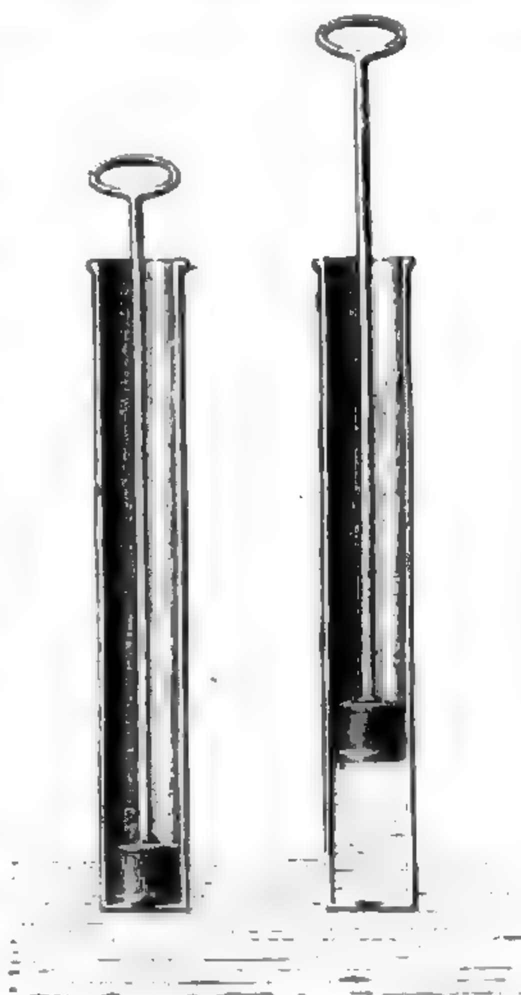


Fig. 157. — Principe de la pompe.

152. Principe de l'ascension de l'eau dans les pompes. — Concevons un tube à la partie inférieure duquel se trouve un piston, et plongeons sa partie inférieure dans l'eau. Si l'on vient à élever le piston, le vide se fait au-dessous de lui, et la pression atmosphérique, s'exerçant sur la surface extérieure du liquide, force celui-ci à s'élever dans le tube et à suivre le piston dans son mouvement. Le même phénomène d'ascension se produirait

quand bien même de l'air aurait été interposé entre la partie inférieure du piston et le liquide, car dans le mouvement ascendant du piston cet air se serait raréfié, et sa pression ne faisant plus équilibre à celle de l'atmosphère, celle-ci aurait déterminé l'ascension d'une colonne liquide dont la pression, ajoutée à celle de l'air, ferait une somme égale à la pression extérieure. Tel est le principe de l'ascension de l'eau dans les pompes. Ces appareils sont d'ailleurs assez divers de forme; nous décrirons ici les types les plus importants.

153. Pompe aspirante. — La pompe aspirante se compose d'un corps de pompe dans lequel se meut un piston; ce corps de pompe communique par un tuyau d'un diamètre plus petit et appelé tuyau d'aspiration, avec le réservoir contenant l'eau à élever. Au point de jonction du corps de pompe et du tuyau d'aspiration se trouve une soupape s'ouvrant de bas en haut et appelée soupape d'aspiration; de même dans l'épaisseur du piston se trouve une ouverture fermée par une soupape, s'ouvrant aussi de bas en haut.

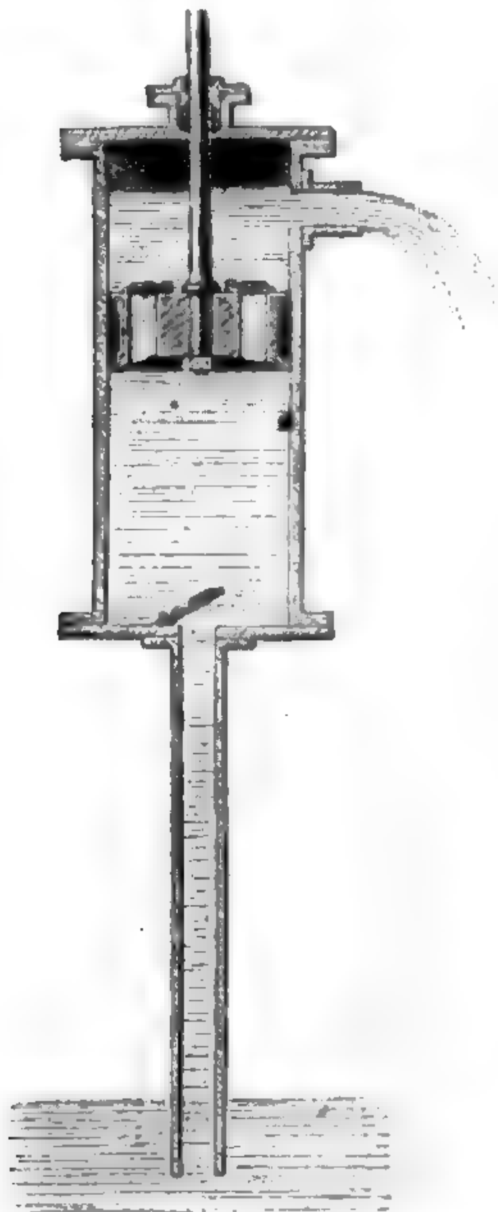


Fig. 158. — Pompe aspirante.

Cela posé, supposons que le tuyau d'aspiration soit rempli d'air à la pression extérieure, et que l'eau, par conséquent, soit au même niveau dans son intérieur et dans le puisard. Supposons, en outre, que, le piston étant au bas de sa course, on vienne à l'élever; le vide se faisant au-dessous du piston, la soupape d'aspiration s'ouvrira et l'air du tuyau d'aspiration se répandra dans le corps de pompe; mais alors sa force élastique diminuant graduellement, la pression atmosphérique déterminera l'ascension de l'eau dans le tuyau, jusqu'à une hauteur telle, que cette hauteur, augmentée de la pression de l'air intérieur, fasse une somme précisément égale à la pression atmosphérique. Si maintenant on abaisse le piston, la soupape

d'aspiration se ferme, l'eau reste au point où elle a été soulevée, et quant à l'air, il se comprime dans le corps de pompe, ouvre la soupape du piston et s'échappe à l'extérieur. Au second coup de piston l'eau montera d'une nouvelle quantité, et une nouvelle portion d'air s'échappera à l'extérieur.

Si donc le tuyau d'aspiration a moins de 10 mètres de hauteur, au bout d'un certain nombre de coups de piston, l'eau pourra atteindre la soupape et s'élever dans l'intérieur du corps de pompe. A partir de ce moment les phénomènes vont changer de nature; en effet, le piston en s'abaissant comprime l'air qui s'échappera au dehors; mais l'eau elle-même passera au-dessus du piston, de sorte que celui-ci étant au bas de sa course, aura au-dessus de lui la quantité d'eau qui a précédemment pénétré dans le corps de pompe. Si alors on soulève le piston, et qu'on suppose, ce qui doit toujours avoir lieu du reste, que la hauteur totale à laquelle il parvient soit à moins de 10 mètres au-dessus du niveau du puisard, l'eau le suivra dans sa course et remplira la capacité du corps de de pompe. Quand le piston descendra ensuite, il fera passer au-dessus de lui cette quantité d'eau et la rejettera à l'extérieur par le déversoir dans le mouvement ascensionnel suivant. Mais une quantité nouvelle d'eau ayant pénétré dans le corps de pompe, les choses se continueront de la même manière.

On voit donc qu'à partir du moment où l'eau a pénétré dans le corps de pompe, où la pompe est *amorcée,* à chaque fois qu'on soulève le piston on rejette au dehors un volume de liquide égal au volume du corps de pompe.

Pour que l'eau puisse arriver jusqu'au corps de pompe, il faut que la soupape d'aspiration soit à moins de 10 mètres au-dessus du niveau de l'eau dans le puisard; s'il en était autrement, l'eau s'arrêterait en un certain point du tuyau sans que le mouvement du piston pût la faire élever davantage.

En outre, pour que la marche de la pompe soit celle que nous avons indiquée, c'est-à-dire pour qu'à chaque ascension du piston on enlève un volume d'eau égal au volume du corps de pompe, il faut que le déversoir lui-même soit à moins de 10 mètres au-dessus du réservoir. On voit donc que la pompe aspirante ne permet pas

d'élever de l'eau à plus de 10 mètres de hauteur. Dans les appareils ordinaires, la hauteur à laquelle l'eau peut être portée est beaucoup moindre, à cause des imperfections de construction dont il sera question plus loin.

154. Condition pour que l'eau atteigne le corps de pompe. — Il pourrait arriver que l'eau n'atteignît pas le corps de pompe, et par conséquent que la pompe ne fonctionnât pas, bien que la hauteur totale à laquelle parvient le piston fût inférieure à 10 mètres. Cette circonstance peut tenir à ce que, quand le piston arrive au bas de sa course, il n'est pas en contact avec la partie inférieure du corps de pompe, il laisse au-dessous de lui un certain espace où se trouve de l'air; la force élastique que cet air possède au moment où le piston est soulevé diminue d'une quantité correspondante la hauteur que peut atteindre l'eau. Si, par exemple, le tuyau d'aspiration a $9^m,50$, et que la force élastique de l'air laissé au-dessous de lui fasse équilibre, au moment de sa plus grande raréfaction, à une colonne d'eau d'une hauteur égale à 1 mètre, il est clair que la hauteur totale à laquelle l'eau pourra s'élever sera inférieure à 9 mètres, et par conséquent elle ne saurait atteindre le corps de pompe.

Exemple. La soupape d'aspiration d'une pompe est placée à 8 mètres au-dessus de la surface de l'eau, et le piston, dont la course totale est de 20 centimètres, reste au point le plus bas à 8 centimètres de la soupape fixe; cherchons si dans ce cas l'eau pourra atteindre le corps de pompe.

Au moment où le piston est au bas de sa course, l'air qu'il laisse au-dessous de lui est à la pression de l'atmosphère; lorsque le piston est élevé, l'air se raréfie et sa pression devient, d'après la loi de Mariotte, les $\frac{8}{28}$ de la pression atmosphérique; cette pression est par conséquent capable de faire équilibre à une colonne d'eau de $10^m \times \frac{8}{28} = 2^m,8$. Il suit de là que la hauteur maxima à laquelle l'eau puisse arriver dans le tuyau d'aspiration est égale à $10^m - 2^m,8 = 7^m,2$, et par suite, comme le tuyau d'aspiration a 8 mètres, on voit que l'eau n'atteindra pas le corps de pompe.

155. Force nécessaire pour soulever le piston. — La force qu'il

faut déployer pour soulever le piston est égale au poids d'une colonne d'eau ayant pour base la section du piston et pour hauteur la hauteur même à laquelle l'eau est élevée. Soient, en effet, S la section du piston, P la pression atmosphérique, h la hauteur de l'eau au-dessus de la position actuelle du piston, h' la hauteur de la colonne d'eau qui est au-dessous; la face supérieure du piston est pressée par une force égale à $P + Sh$; la face inférieure est pressée en sens contraire par la force $P - Sh'$; c'est la différence de ces deux forces, c'est-à-dire $S(h + h')$, qui représente la pression de haut en bas.

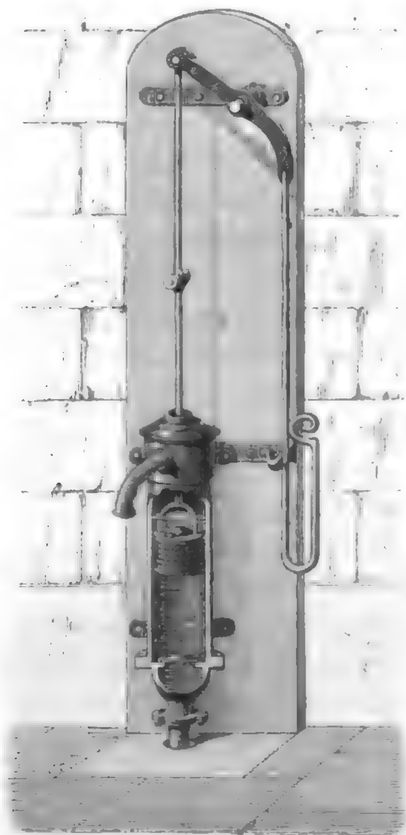
On arriverait à la même conclusion quand bien même l'eau n'aurait pas encore atteint le piston ; en effet, dans ce cas, en désignant par l la hauteur de la colonne d'eau soulevée, la pression au-dessous du piston est égale à $P - Sl$, la pression au-dessus est simplement la pression atmosphérique P ; par conséquent la différence de ces deux pressions agit de haut en bas et a pour valeur Sl.

156. Causes de perte de travail moteur inhérentes aux pompes. — On voit, d'après ce qui précède, que s'il n'y avait pas de frottement à vaincre pendant que le piston monte, le travail moteur serait précisément égal au travail résistant; puisque la force à déployer à chaque instant est précisément le poids de l'eau à soulever ; mais ces frottements sont considérables. D'ailleurs, pour faire mouvoir le piston, on emploie en général des transformations de mouvement qui absorbent pour leur part une portion de la force motrice.

Il faut ajouter que lorsque l'eau arrive dans le déversoir, elle possède une certaine vitesse qui a nécessité une certaine quantité de force, laquelle ne produit aucun effet utile. On voit donc que dans les pompes, comme dans toutes les autres machines, le travail dépensé surpasse de beaucoup l'effet utile.

Indépendamment de ces causes générales de perte de travail moteur, il en est d'autres qui sont inhérentes aux pompes. Ainsi, pendant que le piston descend, le niveau de l'eau ne varie pas dans l'appareil, et, par suite, l'effort correspondant à cette période ne produit aucun travail utile. On fait disparaître cet inconvénient par l'emploi des pompes à double effet, dont nous donnerons plus loin

un exemple. D'autre part, le cylindre est rarement assez bien alésé pour qu'une communication ne s'établisse pas entre le dessus et le dessous du piston; enfin l'air qui se trouve dissous dans l'eau se dégage en partie au moment de l'aspiration, ce qui empêche souvent le corps de pompe de se remplir. Ajoutons encore que l'eau passant dans des tuyaux de diamètres différents éprouve des changements brusques de direction et de vitesse, qui consomment nécessairement une certaine quantité de travail. Toutes ces circonstances diminuent beaucoup



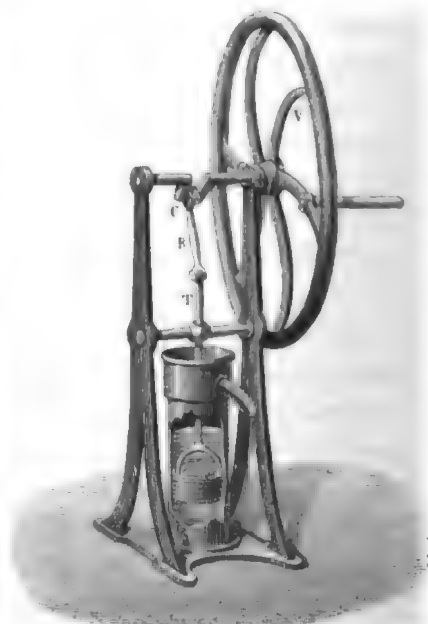


Fig. 159. Pompe aspirante. Fig. 160.

la quantité d'eau élevée, et réduisent à une proportion quelquefois très-faible le rendement de la machine. Dans les pompes de ménage, qui sont en général grossièrement construites, ce rendement peut s'abaisser jusqu'à 0,25 ou 0,30.

Les figures 159 et 160 indiquent les moyens employés ordinairement pour produire le mouvement du piston. La première figure

n'a pas besoin d'explication; on voit que c'est par l'action d'un levier qu'on détermine l'aller et le retour du piston. La seconde figure représente le mécanisme souvent usité à l'aide duquel le mouvement alternatif du piston s'obtient par un mouvement de rotation. A cet effet, la tige du piston T est articulée par l'intermédiaire de la bielle B à la portion coudée C d'un axe auquel on imprime un mouvement de rotation par le moyen de la manivelle à volant V.

157. Pompe foulante. — La pompe foulante se compose d'un corps de pompe plongeant dans l'eau, et muni à sa partie inférieure d'une soupape s'ouvrant de bas en haut. Un tuyau latéral communique avec le corps de pompe, et présente une soupape s'ouvrant de l'intérieur à l'extérieur. Un piston plein se meut dans le corps de pompe, et il est visible que quand le piston s'élève, l'eau s'introduit dans le corps de pompe par la première soupape; que quand il s'abaisse, au contraire, l'eau est refoulée dans le tuyau d'ascension. Plus la hauteur de ce tuyau sera grande, plus la force nécessaire pour abaisser le piston sera considérable, car il faudra vaincre la pression due à la colonne d'eau soulevée.

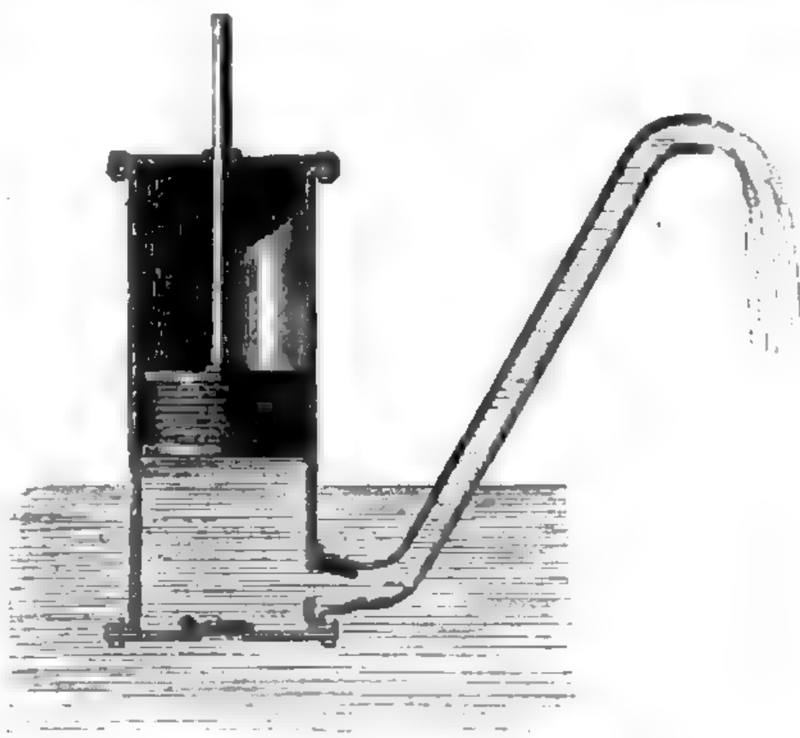


Fig. 161. — Pompe foulante.

158. Pompe à incendie. — La pompe à incendie ordinaire est formée par la réunion de deux pompes foulantes, dont les tuyaux latéraux viennent déboucher dans un réservoir contenant de l'air. Dans l'eau du réservoir plonge un tube, à l'extrémité duquel s'ajuste le tuyau en cuir qui forme le tuyau d'ascension de l'appareil. La pompe est installée dans un réservoir portatif où l'on maintient de l'eau, que l'on apporte directement dans des seaux, en faisant la *chaine* sur le lieu de l'incendie. Les tiges des pistons sont articulées à deux points d'un levier, auquel on donne, à bras d'homme, un

mouvement alternatif; de cette façon, l'eau arrive d'une manière continue dans le réservoir. De plus l'air que celui-ci renferme répartit par son ressort les variations de vitesse du liquide, de façon

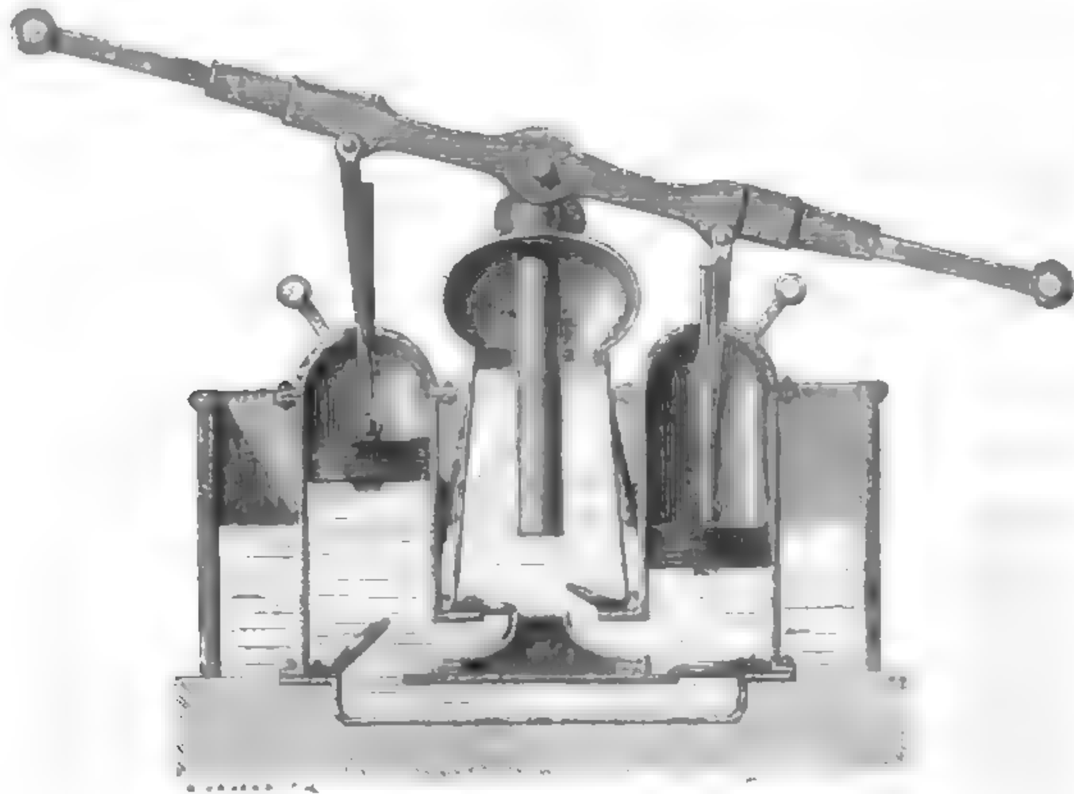


Fig. 162. — Pompe à incendie.

que le jet qui se produit à l'extrémité du tuyau d'ascension a une grande régularité. On a reconnu par l'expérience que cette condition est importante.

159. Pompe aspirante et foulante. — La pompe aspirante et foulante est, comme l'indique son nom, une combinaison des deux dispositions que nous venons de décrire. Elle se compose (fig. 163) d'un corps de pompe dans lequel se meut un piston plein. A la partie inférieure se trouve un tuyau d'aspiration plongeant dans le réservoir d'eau et muni à sa partie supérieure d'une soupape analogue à celle de la pompe aspirante. Le tuyau d'ascension présente à sa partie inférieure une soupape analogue à celle de la pompe foulante. Il suit de là, évidemment, que pendant l'ascension du piston l'eau sera aspirée, et pendant la descente refoulée dans le tuyau d'ascension. Une fois la pompe amorcée, c'est-à-dire une fois le corps de pompe plein d'eau, à chaque descente du piston le tuyau latéral recevra un volume d'eau égal au volume du corps de pompe.

C'est la pompe aspirante et foulante qu'on emploie quand on veut élever l'eau à une hauteur considérable. Le mouvement de

l'appareil est produit souvent par une machine à vapeur; il porte alors le nom de *pompe à feu.*

Lorsque la hauteur à laquelle l'eau doit être élevée est très-considérable, les diverses parties de la machine doivent être ajustées avec une grande solidité pour résister à l'énorme pression produite par la colonne d'eau. Dans ces circonstances en général le piston à étoupes ou à rondelles de cuir ne peut pas être employé, on fait usage d'un piston entièrement métallique, qu'on appelle piston plongeur. La figure 164 représente la section d'une machine de ce genre.

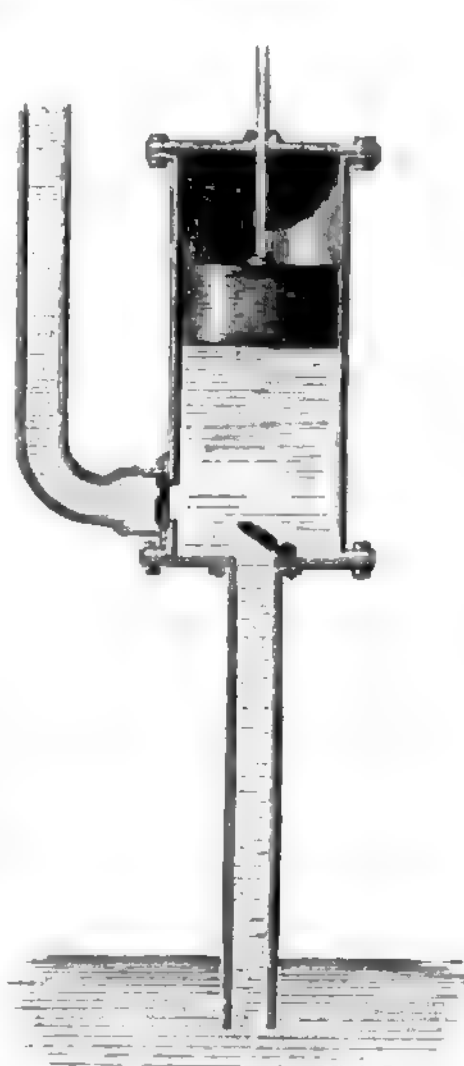


Fig. 163.

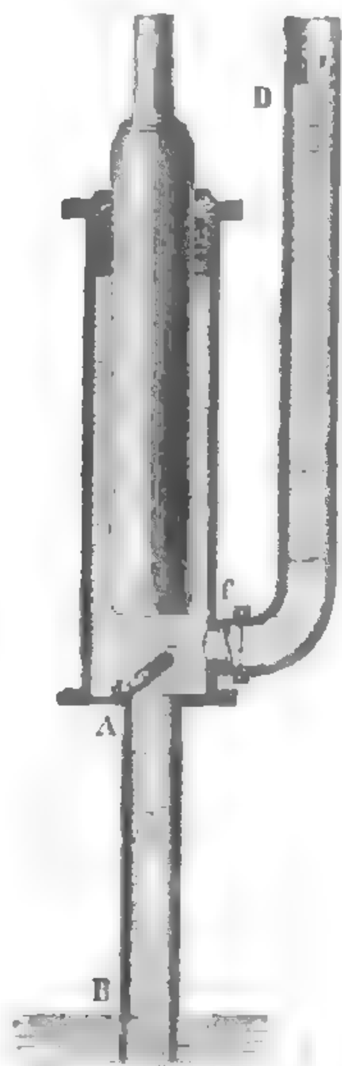


Fig. 164.

Pompe aspirante et foulante.

Le corps de pompe n'est pas alésé; mais il porte à sa partie supérieure une boîte à étoupes, dans laquelle glisse le piston métallique exactement calibré. La soupape d'aspiration est placée en A, la soupape de refoulement en C au bas du tuyau d'ascension D. Le jeu de la machine est le même que dans la pompe qui vient d'être décrite; le mouvement ascendant du piston détermine l'aspiration de l'eau dans le tuyau AB, et le mouvement descendant la refoule dans le tuyau latéral. A mesure que la machine marche, de l'air se dégage de l'intérieur de l'eau et finirait par nuire au jeu de la pompe; on lui donne issue de temps en temps en ouvrant la partie supérieure d'un canal qui est pratiqué dans l'épaisseur du piston.

Dans les mines on a quelquefois à élever l'eau à une hauteur très-considérable; mais cette élévation n'a pas lieu en général d'un seul jet. Une première pompe l'élève jusqu'à un réservoir, dans lequel plonge le tuyau d'aspiration d'une seconde pompe qui fait

monter l'eau à un second réservoir, et ainsi de suite. Les tiges des diverses pompes sont toutes unies à une tige unique appelée *maîtresse tige*, qui reçoit son mouvement d'une machine à vapeur.

160. Pompes à double effet. — On emploie fréquemment dans l'économie domestique des pompes à double effet, dont l'invention est due à Delahire. Elles se composent d'un corps de pompe V V muni de quatre ouvertures A, A', B, B'. Les ouvertures A et B' sont en communication avec le tuyau d'aspiration C; A' et B communiquent avec le tuyau de refoulement C'. Aux quatre ouvertures sont appliquées quatre soupapes qui s'ouvrent toutes dans le même sens, c'est-à-dire de la droite vers la gauche, d'où il suit que A et B' fonctionnent comme soupapes d'aspiration et A' et B comme soupapes de refoulement; quel que soit par conséquent le sens du mouvement du piston, il y a à la fois aspiration et refoulement du liquide. Les pompes à double effet, très-commodes dans l'économie domestique, parce qu'elles peuvent occuper très-peu de place, sont peu usitées dans l'industrie, où l'on préfère accoupler deux pompes dont les pistons sont liés à un balancier de manière à marcher en sens contraire.

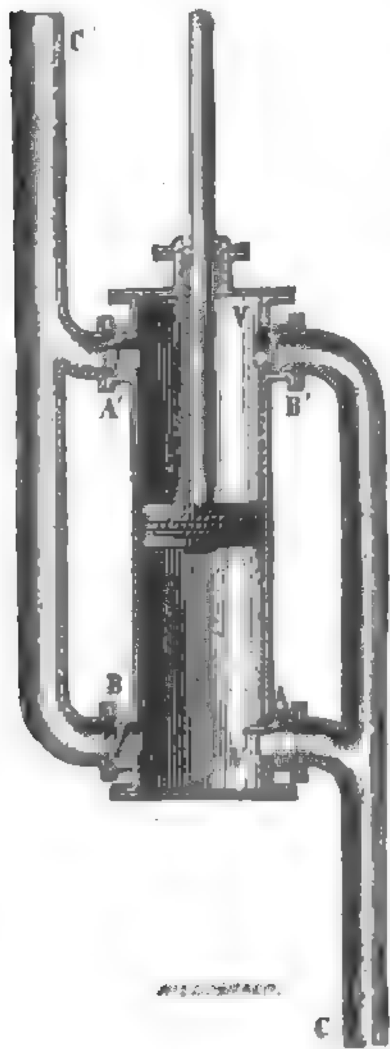


Fig. 165.
Pompe à double effet.

161. Pompes rotatives. — Les pompes à double effet produisent l'aspiration continue de l'eau. On atteint le même but à l'aide des pompes rotatives fort usitées dans certains pays. La figure représente le modèle de Dietz.

Le corps de pompe (fig. 166) se compose d'un tambour cylindrique B, qui contient entre ses deux fonds une seconde boîte A d'un moindre diamètre et sans couvercle, laquelle peut recevoir un mouvement de rotation autour de son axe, à l'aide d'une manivelle; autour de cet axe est fixé à demeure sur l'un des fonds du tambour A un excentrique *mn, m'n'*. La boîte A présente dans son épaisseur quatre entailles à travers lesquelles glissent les languettes *p*,

lesquelles sont constamment, guidées, par le mouvement de l'une de leurs extrémités, sur le profil de l'excentrique. Les extrémités opposées s'appuient sur la face intérieure du tambour B et sur une large lame de fer *ab*, *a'b'*, qui forme comme une cloison dans l'intervalle des deux tambours. Deux ouvertures pratiquées dans cette lame font communiquer le corps de pompe d'une part avec le tuyau d'aspiration C, d'autre part avec le tuyau de refoulement C'. Il résulte de cette disposition que si on imprime à la boîte B un mouvement de rotation dans le sens de la flèche, le vide se faisant derrière les languettes, l'eau sera appelée de ce côté et refoulée du côté opposé. Le profil de l'excentrique étant calculé pour que la distance qui le sépare de la lame de fer soit égale à la largeur de la couronne qui forme le corps de pompe, on voit que ces languettes passeront de la région *ab* à la région *a'b'*, sans qu'il y ait interruption dans le double effet de l'appareil.

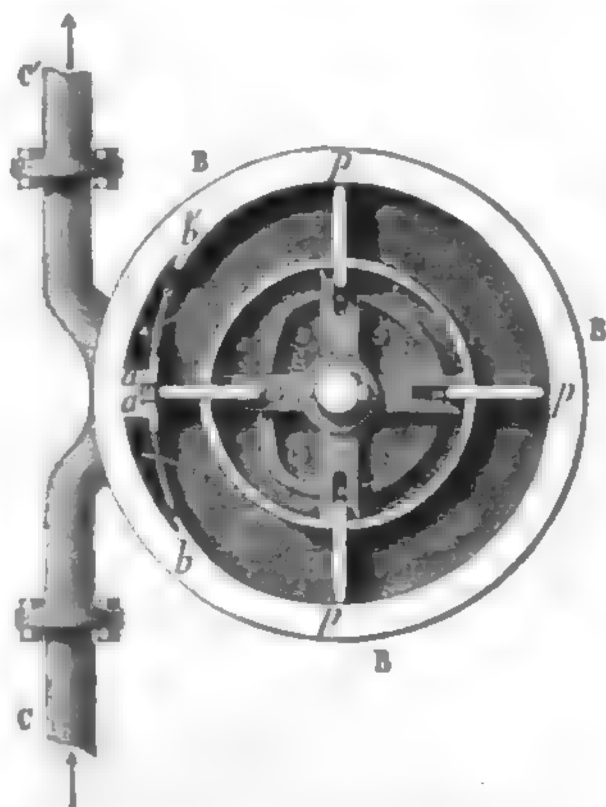


Fig. 166. — Pompe rotative.

162. Presse hydraulique. — La presse hydraulique (fig. 167) se compose d'une pompe aspirante et foulante *aa* que l'on manœuvre à l'aide d'un levier mobile autour de l'axe O. L'eau puisée dans le réservoir BB est refoulée par le tube CC dans la caisse V. La partie supérieure de la caisse présente une ouverture dans laquelle peut se mouvoir un grand piston métallique AA. Celui-ci se termine supérieurement par un grand plateau BB, sur lequel on met les matières à presser. Supposons la caisse V d'abord vide, le piston A descendu par l'action de son propre poids à la partie inférieure de sa course, et imaginons qu'on fasse mouvoir la pompe. La caisse commence par se remplir d'eau, puis la pression exercée par le piston de la pompe se transmet, conformément aux principes exposés (63), à la partie inférieure du piston A; celui-ci s'élève donc, et les matières à comprimer se trouvant prises entre le plateau et la partie supérieure d'un bâti invariable subissent l'action de la pression transmise.

L'intensité de cette pression dépend et du rapport entre les sections des pistons et de la longueur du levier qui sert à manœuvrer la pompe foulante. Supposons, par exemple, que la distance du point m, où agit la main, au point O, soit égale à 12 fois la distance IO,

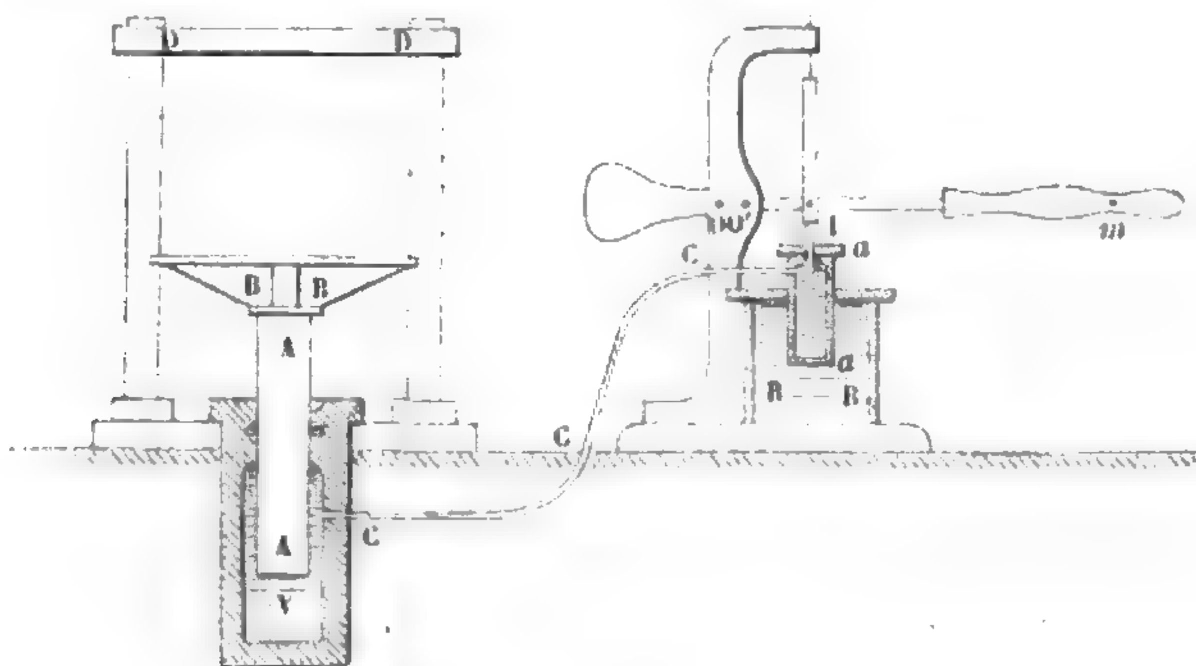


Fig. 167. — Presse hydraulique.

et supposons que l'effort exercé soit égal à 25k. En vertu de la théorie du levier, cela équivaut à un effort de 25×12 au point I, et d'autre part si la section du piston A est 100 fois plus grande que celle du piston de la pompe, la pression transmise en A sera $25^k \times 12 \times 100 = 30000^k$. Ce sont là les conditions ordinaires du modèle généralement usité dans les ateliers. On pourrait d'ailleurs exceptionnellement exercer en m un effort supérieur à 25k ; on peut aussi retirer la pièce métallique qui sert d'axe en O et l'introduire en O' plus près, ce qui augmente l'action du levier.

Deux organes essentiels pour le jeu de la presse hydraulique, et qu'on ne voit pas sur la figure, sont d'une part une soupape de sûreté qui doit s'ouvrir lorsque la pression atteint la limite que l'on ne veut pas dépasser; secondement un robinet placé sur le trajet du tube C et que l'on ouvre lorsque l'on veut mettre fin à l'action de la presse : l'eau s'écoule alors et le piston A redescend à la partie inférieure de la caisse.

La presse hydraulique est une conception de Pascal, mais elle n'a pu être utilisée à l'origine, parce que dès que la pression devenait un peu forte, l'eau s'échappait entre les parois de la caisse et la surface du piston A. C'est à l'ingénieur anglais Bramah qu'est dû

le mécanisme du *cuir embouti* qui empêche la fuite du liquide, ce qui permet par conséquent d'utiliser toute la force de la machine. C'est une couronne de cuir AA (fig. 168) que l'on a travaillée de façon à recourber les bords sur eux-mêmes et qu'on place dans une cavité que présentent les parois intérieures de la caisse. D'après cette disposition, si l'eau vient à passer entre la caisse et le piston, elle pénétrera dans la concavité du cuir embouti et, pressant sur elle, déterminera une fermeture d'autant plus complète que la pression sera plus grande.

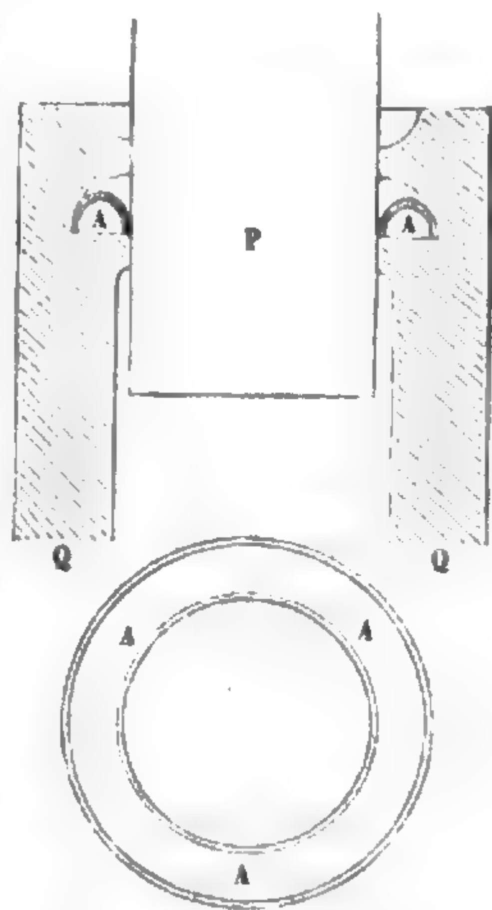


Fig. 168. — Cuir embouti.

La presse hydraulique est une des machines les plus répandues dans l'industrie; c'est aussi une des plus puissantes, et on peut, en restant dans des conditions pratiques de construction, obtenir avec elle des pressions de 200 à 250 mille kilogrammes. Ces puissants appareils peuvent servir alors soit à opérer des tractions extrêmement considérables, ainsi que cela a lieu dans l'épreuve des fers des ancres, soit à soulever de très-grands fardeaux. Ainsi c'est avec la presse hydraulique qu'on a pu soulever des travées entières du pont tubulaire de l'île d'Anglesey, qu'on a pu mettre à flot le *Great Eastern*, etc.

CHAPITRE XVIII.

RÈGLE DE TORRICELLI.

163. Lorsqu'on vient à pratiquer une ouverture dans la paroi d'un vase contenant un liquide, celui-ci s'écoule avec une vitesse d'autant plus grande, que le niveau est plus élevé au-dessus de l'orifice, ou, comme on le dit, que la charge est plus grande. Torricelli a exécuté sur ce point de la mécanique des liquides des expériences qui l'ont conduit à ce résultat, que la vitesse d'écoulement est égale à celle qu'acquerrait un corps en tombant librement depuis la surface libre jusqu'au centre de l'orifice. Si l'on appelle h cette distance, la vitesse d'écoulement v est donnée par la formule

$$V = \sqrt{2gh}. \qquad (a)$$

C'est ce que l'on appelle la règle de Torricelli; cette règle suppose que l'orifice est percé en *mince paroi* et que son diamètre est très-petit relativement à celui du vase. On admet encore que l'orifice et la surface libre sont placés dans les mêmes conditions, tous les deux dans l'air ou tous les deux dans le vide, par exemple.

La règle de Torricelli a été considérée comme une conséquence immédiate de la théorie de la pesanteur, d'après laquelle, quel que soit le chemin suivi par une molécule pesante, sa vitesse ne dépend que de la hauteur du point de départ au-dessus du point d'arrivée; si cette hauteur est h, la vitesse est toujours $\sqrt{2gh}$.

Mais il n'est pas évident que les molécules d'un liquide qui s'écoule ne sont soumises qu'à l'action de la pesanteur. D'ailleurs les

premières portions sorties du vase ne viennent pas de la surface, et leur vitesse est due seulement à la pression exercée par la colonne liquide ; on voit donc que la loi de l'écoulement, à raison de ce que le phénomène paraît avoir de complexe, ne saurait être démontrée avec rigueur que par la méthode expérimentale. Il est d'ailleurs facile d'instituer à cet égard une expérience fort simple. En effet, les molécules sortant de l'orifice sont lancées avec une certaine vitesse, elles doivent donc se mouvoir dans l'air comme un projectile



Fig. 169. — Appareil pour vérifier expérimentalement la règle de Torricelli.

et décrire une trajectoire sensiblement parabolique. La veine liquide qui sort du vase devra donc avoir à peu près la forme d'une parabole, et si l'on parvient à mesurer l'amplitude ou la portée de la courbe, on pourra en déduire la vitesse d'impulsion.

Ces expériences peuvent se faire facilement à l'aide de l'appareil représenté par la figure 169. C'est un cylindre sur lequel sont disposés suivant une même ligne verticale des orifices équidistants. Un

robinet placé au-dessus de l'appareil maintient, par un trop-plein qui s'écoule d'une manière continue, le niveau à une hauteur au-dessus de l'orifice le plus élevé, égale à la distance de deux orifices quelconques.

Le liquide qui s'écoule est reçu dans une rigole dont le bord est divisé. Un petit chariot muni d'un repère se meut sur la rigole; il porte, comme on le voit par le détail placé à côté de la figure principale, un disque percé d'une ouverture circulaire que l'on peut faire tourner d'une manière quelconque autour d'un axe horizontal passant par son centre. De cette façon, on peut toujours donner au disque une position telle, que son plan soit normal à la veine liquide, et que, par suite, celle-ci passe librement et exactement à travers l'anneau. Le repère du chariot indique ainsi avec assez de précision la portée du jet parabolique. Cette portée est relative au plan vertical qui contient les orifices et elle est mesurée sur le plan horizontal qui passe par le centre de l'anneau. Remarquons que ce dernier plan est situé au-dessous de l'orifice inférieur d'une quantité égale à la distance de deux orifices quelconques.

Voici comment on peut calculer le résultat d'une expérience. Soit a la hauteur de l'orifice au-dessus du plan horizontal qui passe par le centre de l'anneau, et b l'amplitude de la veine. Si les molécules tombaient simplement de la hauteur b, elles parcourraient cet espace dans un temps donné par la formule

$$b = \frac{gt^2}{2}. \qquad (1)$$

D'autre part, si elles obéissaient simplement à l'impulsion à l'orifice, elles parcourraient, en vertu de leur vitesse initiale x, l'espace a dans le même temps t; on a donc

$$a = xt. \qquad (2)$$

Éliminant t entre ces deux équations, il vient

$$b = \frac{ga^2}{2x^2},$$

d'où

$$x = a\sqrt{\frac{g}{2b}}.$$

En comparant cette vitesse à celle que donne le théorème de Torricelli, on trouve en général une très-petite différence; c'est ce que montre le tableau suivant, emprunté au *Traité d'hydraulique* de M. Daubuisson :

CHARGES.	JET.		VITESSE		RAPPORT des VITESSES.
	a.	*b.*	réelle.	théorique	
mètres.	mètres.	mètres.			
2,29	6,28	7,53	6,65	6,70	0,993
3,93	4,66	8,45	8,67	8,70	0,988
7,17	1,41	6,25	11,67	11,88	0,983

164. Intersection des veines. — Si la règle de Torricelli est exacte, la valeur de x qui vient d'être trouvée doit être égale à $\sqrt{2gh}$; on a donc l'égalité

$$a\sqrt{\frac{g}{2b}}=\sqrt{2gh}, \quad \text{d'où} \quad a^2=4bh. \qquad (3)$$

On tire de là une conséquence curieuse; on voit en effet que si b et h varient de manière que leur produit soit constant, la valeur de a reste la même. On vérifie aisément ce fait avec l'appareil. Il suffit en effet d'ouvrir simultanément l'orifice inférieur et l'orifice supérieur, ou bien le deuxième et le quatrième : on obtient deux veines qui viennent se couper en un même point au centre de l'anneau.

Remarquons toutefois que la vérification de cette conséquence ne démontre pas le théorème de Torricelli, car elle ne cesserait pas d'être exacte quand bien même dans la formule (3) la constante 4 serait remplacée par toute autre; mais elle fait voir très-nettement que la vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la charge, et non point à la charge elle-même, comme on l'a cru quelquefois.

165. Dépense. — Il semble au premier abord que l'on puisse soumettre le théorème de Torricelli au contrôle de l'expérience par une méthode aussi simple que rigoureuse. Supposons qu'on entre-

tienne un niveau constant dans un vase, et qu'on mesure le volume du liquide écoulé par un orifice pendant un certain temps, ce volume peut être calculé *à priori*. Il est clair en effet que, pendant l'unité de temps, il sortira un cylindre d'eau ayant pour base la section de l'orifice et pour hauteur la vitesse, de sorte que la quantité d'eau écoulée pendant le temps t sera donnée par la formule

$$D = ts\sqrt{2gh},$$

s étant la section de l'orifice. Or, dans toutes les expériences qui ont été faites, on a trouvé des résultats constamment inférieurs à ceux que donne la théorie. La moyenne de ces résultats indique que la dépense observée est environ les 0,6 de la dépense théorique.

Ce désaccord entre la théorie et l'expérience ne contredit point la loi de Torricelli démontrée directement, mais il accuse quelque inexactitude dans l'évaluation des quantités qui entrent dans la formule de la dépense. Cette inexactitude ne peut évidemment porter que sur s, et en effet, en admettant que la veine liquide est un cylindre de section s, on commet une erreur. La veine n'est pas en réalité cylindrique, elle se contracte en sortant de l'orifice jusqu'à une petite distance de celui-ci, et la section contractée paraît être les 0,6 environ de la section de l'orifice. A partir de la section contractée la veine s'amincit encore si elle est descendante, mais d'une manière très-lente et par l'effet même de la pesanteur. C'est dans la section contractée que s'établit un même régime de vitesse pour les filets liquides convergents qui arrivent à l'orifice, et c'est sa surface, par conséquent, qu'on doit mettre à la place de s dans la formule de la dépense. On fait disparaître ainsi le désaccord entre la théorie et l'expérience.

166. Ajutages. — L'exactitude des raisonnements précédents se trouve confirmée par l'influence qu'exercent les ajutages. On désigne ainsi des bouts de tuyau de quelques milimètres de longueur que l'on adapte à l'orifice en mince paroi. Si l'on met, par exemple, un ajutage cylindrique, la contraction disparaît par suite de l'adhérence du liquide contre le tuyau ; la veine a alors pour section la section même de l'ajutage. Or dans ce cas, si on mesure la vitesse, on la trou-

vera moindre que lorsque l'orifice est en mince paroi, mais en se servant de la vitesse ainsi obtenue, la dépense calculée est rigoureusement d'accord avec la dépense effective.

L'appareil décrit plus haut permet de constater les variations de vitesse auxquelles donnent lieu les ajutages. On se sert pour cela d'une plaque mobile portant un orifice en mince paroi et deux ajutages, l'un cylindrique et l'autre conique; on peut, en faisant glisser la plaque, déterminer l'écoulement du liquide par l'une ou l'autre de ces ouvertures.

167. Écoulement par les tuyaux. — Lorsque, au lieu de s'écouler par un petit ajutage, le liquide suit un long tube, la vitesse se trouve considérablement modifiée par le frottement des molécules entre elles et contre les parois du tuyau. Cette vitesse n'est d'ailleurs pas la même dans les différents points d'une même section, elle est la plus petite possible au contact des parois et la plus grande au centre de la colonne liquide. Lorsqu'un débit uniforme s'est établi, il passe à chaque instant la même quantité d'eau en une section donnée, et on peut supposer que ce résultat soit produit par une vitesse constante de tous les points de la colonne liquide : c'est ce que l'on appelle la vitesse du liquide dans le tuyau.

On a fait beaucoup d'expériences pour déterminer cette vitesse dans un certain nombre de cas particuliers, mais il est difficile de traiter la question d'une manière rationnelle et tout à fait générale.

Voici une formule donnée par de Prony, et qui peut être employée dans la pratique toutes les fois que la longueur du tuyau surpasse 400 fois le diamètre :

$$V = -0,025 + 26,77\sqrt{\frac{DH}{L}}.$$

L est la longueur du tuyau, D son diamètre et H la différence de hauteur de ses deux extrémités.

168. Jets d'eau. — Si à l'extrémité inférieure d'un tuyau de conduite on adapte un ajutage dirigé de bas en haut, le liquide, en vertu de la vitesse qu'il possède, plus ou moins modifiée par l'ajutage lui-même, jaillira verticalement : c'est ce que l'on appelle un jet d'eau. S'il n'y avait aucune résistance, le liquide devrait

s'élever jusqu'à la hauteur que produirait la vitesse qui a lieu à l'orifice; mais il n'en est pas ainsi. En effet, le frottement du liquide contre lui-même et le poids des molécules qui retombent les unes sur les autres détruisent une partie de l'impulsion. On peut atténuer l'effet de cette dernière cause en inclinant très-légèrement le jet; on peut aussi faire arriver un peu d'air dans la colonne d'eau, d'où résulte une sorte de liquide de densité plus faible et qui s'élève naturellement plus haut.

169. Écoulement d'un liquide en communication avec une masse limitée d'air. — Lorsque la surface du liquide est en communication avec une masse d'air, dont la pression peut varier, la vitesse d'écoulement est elle-même variable. Soit ABCD un vase fermé contenant un liquide jusqu'en MN, et au-dessus de l'air à la pression atmosphérique. Si on pratique un petit orifice à la partie inférieure, l'écoulement aura lieu; mais, l'air se raréfiant graduellement, il arrivera un moment où sa pression augmentée de la colonne liquide fera équilibre à la pression atmosphérique; à ce moment l'écoulement s'arrêtera. Cherchons quelle sera alors la hauteur x du liquide dans le vase. Soit $AC = l$, $AM = h$ et p la hauteur du liquide qui fait équilibre à l'atmosphère. L'air, qui à l'origine sous le volume $l - h$ était à la pression p, aura sous le volume $l - x$ une pression $p\ \dfrac{l-h}{l-x}$, laquelle ajoutée à x devra être égale à la pression extérieure; on a donc



Fig. 170.

$$p\frac{l-h}{l-x} + x = p,$$

d'où

$$x = \frac{p + l \pm \sqrt{(p+l)^2 - 4ph}}{2}.$$

C'est seulement la racine correspondante au signe — du radical qui doit être admise, l'autre étant plus grande que l. Ce cas d'équilibre se rencontre dans diverses expériences très-connues.

Pipette. — C'est un tube de verre (fig. 171), ouvert aux deux bouts et dont la partie inférieure se termine par un petit bec effilé.

Si par aspiration ou par immersion directe on fait pénétrer une certaine quantité de liquide dans le tube et qu'on ferme avec le doigt la partie supérieure, l'écoulement s'arrêtera au bout de quelques instants. En rendant l'air en haut on le fera recommencer, et on pourra à volonté l'arrêter et le suspendre.



Fig. 171. — Pipette.

Entonnoir magique. — Cet entonnoir est double, comme le montre la figure 172. Près de l'anse se trouve une petite ouverture mettant en communication avec l'extérieur la partie comprise entre les deux entonnoirs. Une autre ouverture fait communiquer cette même cavité avec le tuyau de l'entonnoir intérieur. Si, par un moyen quelconque, on vient à remplir d'un liquide l'intervalle entre les deux parois, ce liquide s'écoulera ou non, suivant qu'on découvrira ou qu'on fermera l'ouverture supérieure. Cette double opération peut être faite très-facilement par le doigt qui tient l'entonnoir, sans que le spectateur s'en aperçoive, d'où résulte un petit spectacle de physique amusante très-anciennement connu.

On peut employer l'instrument d'une manière plus curieuse. A cet effet on remplit secrètement la cavité intérieure de vin, et on l'empêche de s'écouler en fermant la petite ouverture d'en haut.



Fig. 172. — Entonnoir magique.

On verse ensuite de l'eau dans la coupe centrale; ce liquide s'écoule seul ou mêlé avec le vin, suivant que le doigt maintient fermé ou dégage l'orifice d'entrée de l'air. Dans le second cas, l'eau étant colorée par du vin, c'est ce dernier liquide qui paraîtra s'écouler; il semblera donc qu'on puisse faire couler à volonté de l'eau ou du vin.

Bouteille inépuisable. — La bouteille inépuisable est un jeu du même genre. Elle est formée d'une bouteille à parois opaques en tôle ou en gutta-percha, renfermant dans son intérieur cinq petites fioles. Celles-ci communiquent avec l'extérieur par cinq petites ouvertures que l'on peut fermer avec les cinq doigts de la main. Elles sont munies d'ailleurs chacune d'un petit goulot qui vient

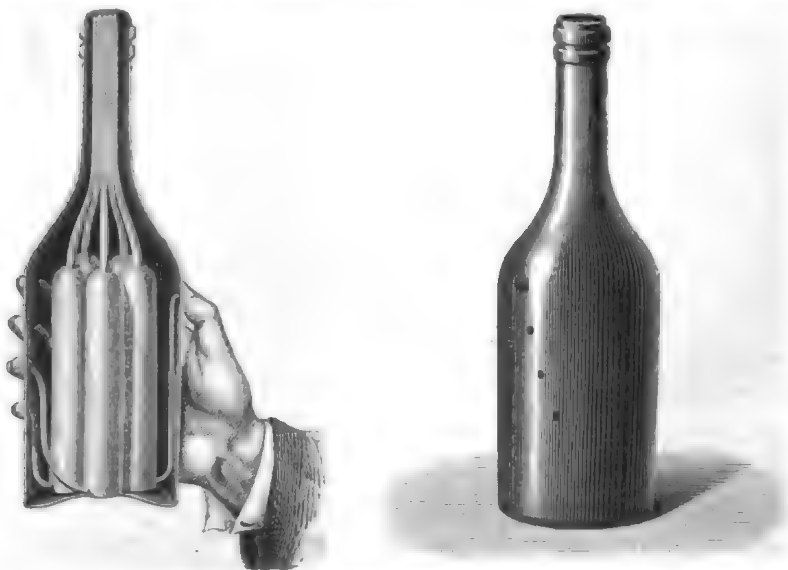


Fig. 173. — Bouteille inépuisable.

se rendre dans le goulot général de la bouteille. On commence par remplir les cinq fioles de cinq liqueurs différentes, et la partie comprise entre elles d'un sirop simple. Si l'on maintient ouvert l'un des orifices, il s'écoulera un mélange de sirop et d'une des cinq liqueurs, qui pourra évidemment représenter la liqueur elle-même. Le sirop neutre est destiné à être versé seul dans des verres *préparés* de façon à obtenir des liqueurs autres que celles qui figurent dans les fioles. Cet artifice combiné avec d'habiles substitutions d'une bouteille à une autre, permet de se rendre compte de l'intérêt qu'excite en général cette expérience, quand elle est exécutée par un *physicien* habile.

170. Fontaine intermittente. — La fontaine intermittente est un appareil analogue aux précédents, seulement les intermittences

d'écoulement se produisent d'une manière automatique par le jeu de l'instrument, sans intervention de l'opérateur. Elle se compose d'un ballon V que l'on peut fermer hermétiquement à l'aide d'un bouchon, communiquant, à volonté, avec des ajutages *a*, par lesquels peut s'écouler l'eau qu'il contient. Un tube droit *t* s'élève jusqu'à la partie supérieure du ballon, et se termine inférieurement à une petite distance du fond du bassin B. Ce dernier est percé d'une petite ouverture *o*, par laquelle l'eau qu'il reçoit s'écoule dans le bassin inférieur C. Supposons qu'on mette de l'eau dans le ballon et qu'on établisse la communication avec les ajutages, le liquide s'écoulera dans le bassin B, et de ce dernier dans C. Mais le diamètre de l'ouverture *o* est tel qu'elle débite moins d'eau qu'il n'en tombe des ajutages; le liquide s'accumulera donc dans B, et finira par couvrir l'extrémité inférieure du tube *t*. A ce moment, la communication sera supprimée entre l'air extérieur et la partie supérieure du ballon ; l'écoulement s'arrêtera donc au bout de quelques instants. Mais le bassin B continuant à se vider par l'ouverture *o*, le liquide du bassin descendra au-dessous de l'extrémité inférieure du tube; alors l'air pénétrera dans l'intérieur du ballon, l'écoulement recommencera pour s'arrêter de nouveau, et ainsi de suite.

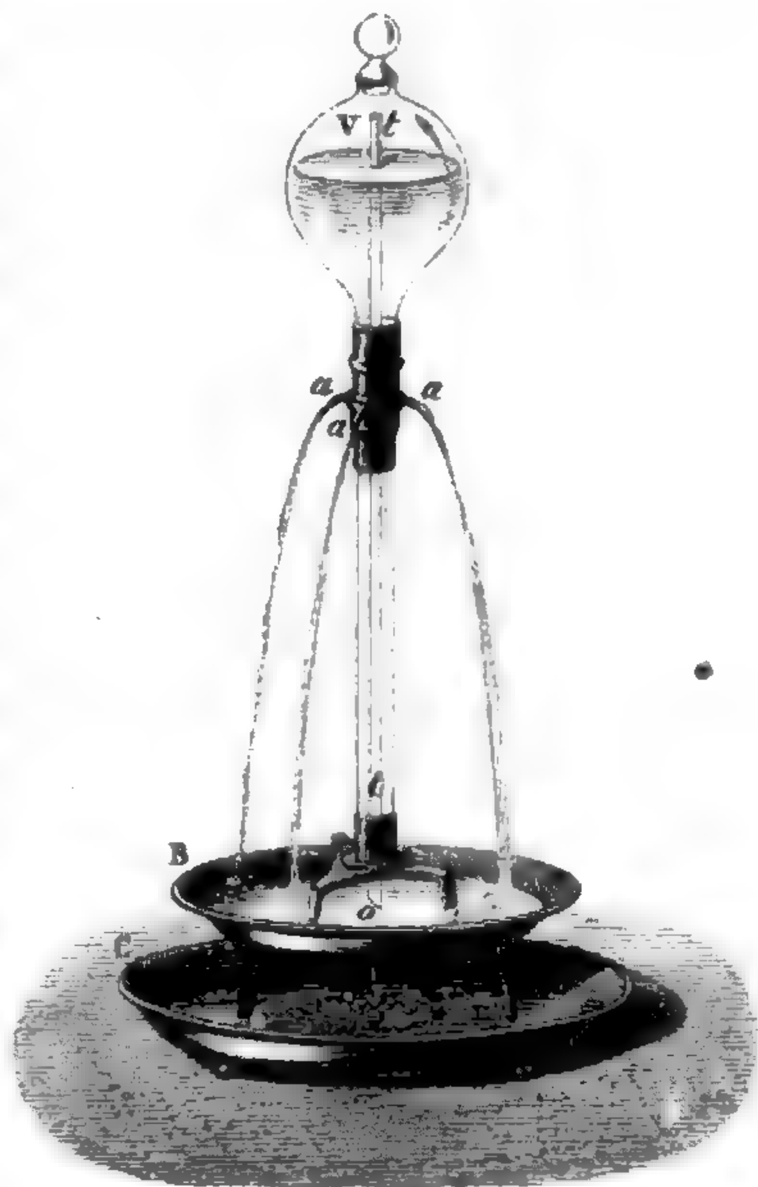


Fig. 174. — Fontaine intermittente.

171. Siphon. — Le siphon a pour objet le transvasement d'un liquide d'un vase dans un autre. Il se compose essentiellement d'un tube recourbé (fig. 175) à branches inégales. La petite branche plonge dans le liquide à transvaser, l'autre s'ouvre directement dans l'air. Si on suppose le siphon plein de liquide, c'est-à-dire amorcé,

il est facile de voir que l'écoulement aura lieu de la petite à la longue branche.

Considérons en effet (fig. 176) une couche de liquide M située dans la partie la plus élevée du siphon; cette couche éprouvera, de gauche à droite, une pression égale à la pression atmosphérique, diminuée de la hauteur DC ou MI.

Si on désigne cette dernière par h et par H la pression extérieure exprimée en hauteur du liquide qui remplit le siphon, la



Fig. 175. — Siphon.

pression de gauche à droite sera $H - h$. La pression de droite à gauche sera $H - EF = H - h'$. Or, h' étant plus grand que h, la première pression l'emportera sur la seconde; la couche M se mouvra donc de gauche à droite. Mais si la petite branche du siphon a une hauteur inférieure à H, la colonne liquide ne peut point se diviser, car la pression atmosphérique ferait immédiatement remplir par le liquide le vide qui se serait formé, l'écoulement aura donc lieu d'une manière continue jusqu'à ce que le liquide dans le vase AB soit descendu au-dessous de l'extrémité de la petite branche du siphon.

La force qui produit l'écoulement est la pression représentée

par une colonne de liquide $h' - h$; la vitesse d'écoulement est donc égale à $\sqrt{2g(h' - h)}$, abstraction faite du frottement.

Nous avons supposé dans le raisonnement précédent que la pression extérieure H est la même en C et en F; cela est évidemment légitime quand cette pression est celle de l'air extérieur. Si on suppose que le milieu ambiant ait une densité telle que l'on ne puisse négliger la variation de la pression du niveau AB au niveau KF, l'expression de la vitesse doit être modifiée. Soit d la densité du liquide à transvaser, d' celle du milieu ambiant; l'excès de pression de gauche à droite est représenté par le poids d'une colonne liquide de densité d et de hauteur $h' - h$, moins le poids d'une colonne de même hauteur de densité d', c'est-à-dire par l'expression $(h' - h)\, d - (h' - h)\, d' = (h' - h)(d - d')$.

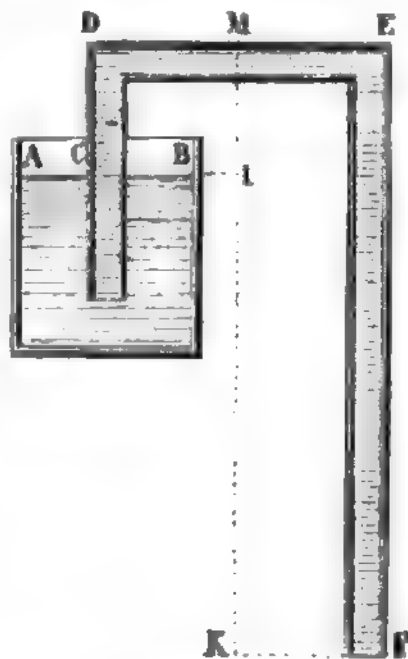


Fig. 176.

Or la hauteur m du liquide à transvaser qui produirait la même pression serait donnée par la relation $md = (h' - h)(d - d')$.

La vitesse d'écoulement sera donc

$$V = \sqrt{2gm} = \sqrt{\frac{2g(h' - h)(d - d')}{d}}.$$

Dans le cas, fictif d'ailleurs, où d' serait plus grand que d, la pression de gauche à droite serait négative, c'est-à-dire que c'est de droite à gauche que se produirait l'excès de pression. L'écoulement aurait donc lieu de droite à gauche et avec une vitesse donnée par la formule précédente dans laquelle on changerait $d - d'$ en $d' - d$.

172. Amorcement du siphon. — Pour que le siphon fonctionne, il faut qu'il soit préalablement amorcé. Cet amorcement se fait de diverses façons. Quand le liquide peut pénétrer sans danger dans la bouche, on agit par aspiration (fig. 177) en se servant d'un tube latéral soudé à la longue branche. Lorsque le liquide appelé par l'aspiration a dépassé la courbure du siphon, celui-ci est amorcé.

Mais ce procédé, très-employé dans l'économie domestique,

ne saurait servir dans le cas des liquides qui peuvent avoir une action plus ou moins délétère. Voici, par exemple, le mode d'amorcement employé dans le transvasement de l'acide sulfurique :

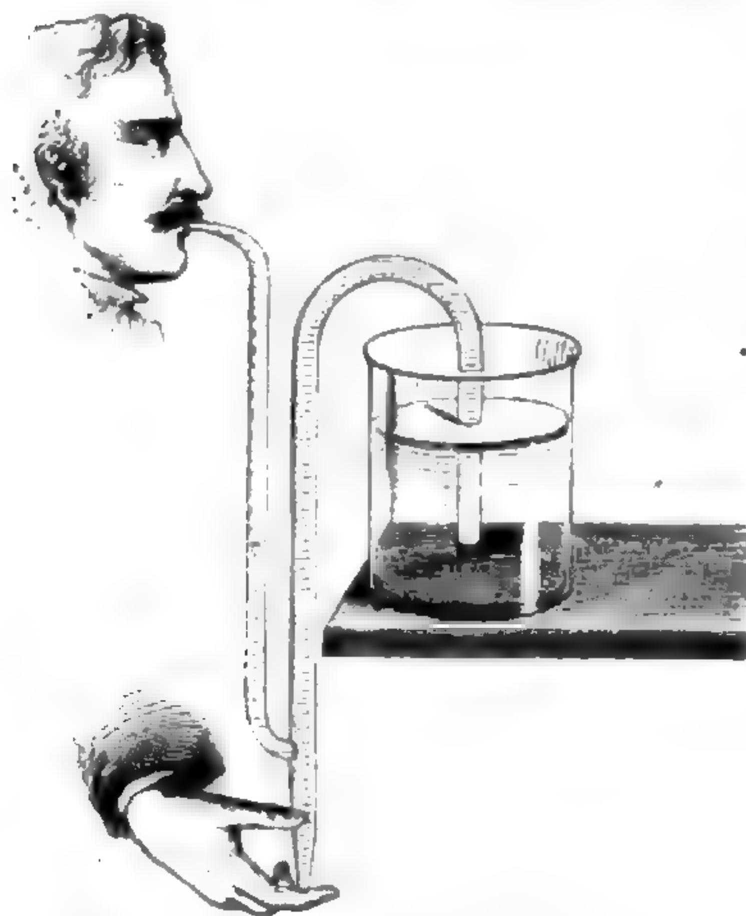


Fig. 177. — Amorcement du siphon.

La longue branche du siphon (fig. 178) est préalablement remplie d'acide sulfurique; on se sert pour cela de deux robinets à entonnoir placés à la courbure de l'appareil. L'un d'eux sert à l'introduction du liquide et l'autre à la sortie de l'air. On ferme alors les deux robinets supérieurs et on laisse écouler le liquide en ouvrant le robinet inférieur. L'air qui occupe la petite branche plongeant dans l'acide se raréfie, l'acide monte, et, s'il arrive à dépasser la courbure, il y aura amorcement, car à chaque portion de liquide qui sortira de l'appareil, correspondra une portion venant de la petite branche à la longue branche.



Fig. 178. — Siphon à transvaser l'acide sulfurique.

Il ne suffit pas, pour que le siphon à acide sulfurique fonctionne, que la hauteur verticale de la longue branche soit plus grande que celle de la petite, il faut encore qu'elle dépasse une certaine limite qui dépend elle-même des dimensions particulières des instruments. Pour calculer cette limite, il faut remarquer qu'à mesure que l'écoulement a lieu, la hauteur du liquide diminue dans la longue branche et augmente dans la petite; si elles parvenaient à l'égalité, il y aurait équilibre. On voit donc qu'en supposant que

l'amorcement soit seulement possible, il faut qu'au moment où il se produit il reste dans la longue branche une colonne de liquide dont la hauteur verticale soit au moins égale à la hauteur du liquide soulevé dans la petite branche. Soit h cette hauteur; si l'on désigne par α l'angle que font les deux branches du siphon, la longueur qui reste dans la longue branche est égale à $\frac{h}{\cos\alpha}$. L'air qui occupait la hauteur h sous la pression atmosphérique H, occupe au moment de l'amorcement et sous la pression $H-h$ une longueur égale à $L - \frac{h}{\cos\alpha}$, L désignant la plus petite longueur que l'on puisse donner à la longue branche du siphon. On a donc, d'après la loi de Mariotte,

$$hH = (H-h)\left(L - \frac{h}{\cos\alpha}\right) \quad \text{d'où} \quad L = \frac{h}{\cos\alpha} + \frac{hH}{H-h}.$$

Dans cette formule, H représente la hauteur d'acide sulfurique qui fait équilibre à la pression atmosphérique.

173. Vase de Tantale. — On peut, à l'aide du siphon, produire un écoulement intermittent. Soit, par exemple, un vase dans l'intérieur duquel se trouve un tube recourbé s'élevant jusqu'en n dont la petite branche se termine au fond du vase, tandis que la longue branche en traverse le pied. Si l'on fait arriver du liquide dans le vase, le niveau s'élèvera graduellement dans le tube recourbé, et finira par atteindre et dépasser le point n; mais alors le siphon, étant amorcé, donnera issue au liquide que contient le vase. Or, si l'on suppose que le siphon débite plus d'eau qu'il n'en arrive, le vase se videra, puis le siphon s'amorcera de nouveau et ainsi de suite.

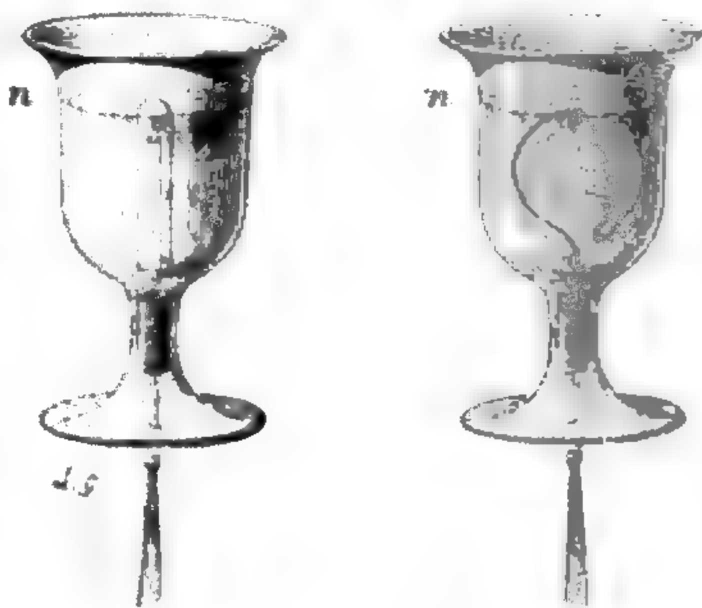


Fig. 179. — Vase de Tantale.

Si l'on conçoit la coupe en métal, et le siphon caché dans l'épaisseur, en inclinant le vase pour le porter à la bouche du côté de la courbure du siphon, l'amorcement aura lieu et le liquide *fuira*. De là le nom de *vase de Tantale* que porte cet appareil dans

les vieux traités de physique. Au lieu d'un tube recourbé, on peut se servir, comme le montre la première figure, d'un tube droit recouvert par une petite cloche; le siphon est alors formé par l'espace annulaire compris entre le tube et la cloche.

C'est par une disposition analogue qu'on s'accorde à expliquer



Fig. 180. — Fontaine intermittente.

les fontaines intermittentes naturelles. Supposons qu'un réservoir (fig. 180) communique avec l'extérieur par un tube recourbé formant siphon et soit alimenté par un filet d'eau d'un débit inférieur à celui du siphon lui-même. Lorsque l'eau aura atteint la courbure, le siphon s'amorcera et le réservoir se videra, puis il se remplira de nouveau jusqu'à la courbure et ainsi de suite. Il est important de remarquer que, pour que l'intermittence se produise, l'eau doit arriver avec une certaine force sur la courbure, laquelle ne doit pas d'ailleurs avoir une section trop considérable, sans cela l'eau se déverserait directement, le tube ne se remplirait pas et le siphon ne fonctionnerait pas. L'air paraît jouer un rôle dans l'accomplissement de ces diverses conditions. Il est certain dans tous les cas que de l'air s'accumule et se comprime dans les réservoirs

de fontaine intermittente; car très-fréquemment, au moment où l'écoulement cesse, de l'air est expulsé avec une certaine violence.

174. Vase de Mariotte. — Le vase de Mariotte est un appareil dont on se sert fréquemment pour obtenir un écoulement constant de liquide. Il se compose d'un flacon dont le bouchon est traversé par un tube droit ouvert aux deux bouts et dont l'extrémité inférieure arrive en *a*. Un ajutage est placé en *b* à la partie inférieure du flacon. Supposons que le flacon étant plein d'eau et le tube également jusqu'à sa partie supérieure, on ouvre l'ajutage *b*. Les molécules placées à l'orifice subissent de dehors en dedans une pression égale à la pression atmosphérique, et sont poussées de dedans en dehors avec une force qui surpasse la pression atmosphérique de toute la hauteur d'eau jusqu'à la partie supérieure du tube. Il y aura donc

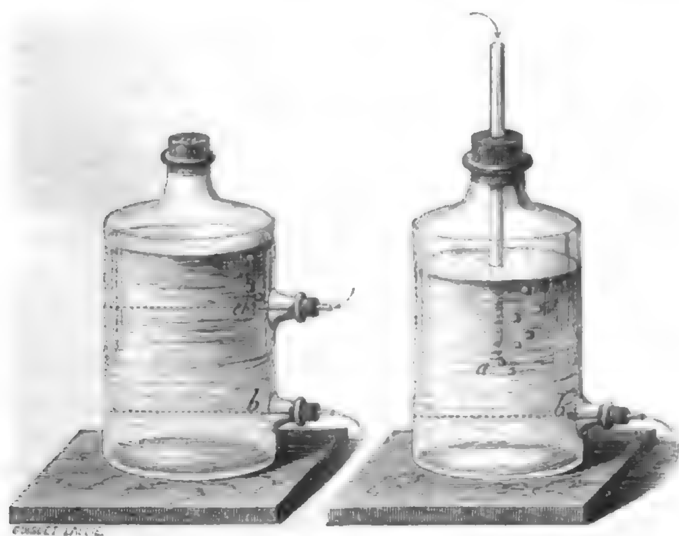


Fig. 181. — Vase de Mariotte.

écoulement, mais aucun vide ne pourra se faire à la partie supérieure du flacon, car la pression atmosphérique forcera le liquide du tube à remplacer celui qui s'écoule. Le niveau descendra donc rapidement dans le tube, et la vitesse décroîtra graduellement, ce qu'on reconnaîtra à la diminution de l'amplitude de la veine. Lorsque le liquide sera arrivé au point *a*, l'écoulement continuera; mais alors

de l'air s'introduira bulle à bulle dans l'appareil, et s'élèvera à la partie supérieure du flacon, de façon que sa pression augmentée de la hauteur d'eau supérieure au plan horizontal passant par le point *a* maintienne dans ce plan une pression égale à la pression atmosphérique. A partir de ce moment, l'écoulement se fera avec une vitesse constante due à une charge égale à la distance verticale des points *a* et *b*. Rigoureusement parlant, la vitesse n'est pas constante, car l'air s'introduit non pas d'une manière continue, mais bulle à bulle, c'est-à-dire par saccades, mais il ne résulte de là que de légères oscillations, et on peut considérer la dépense moyenne, pendant un temps même assez court, comme constante. A la place du tube droit, on peut se servir d'un vase muni de deux ouvertures à deux niveaux différents; le liquide s'écoule par l'orifice inférieur *b*, tandis que l'air rentre par l'orifice supérieur *a*. On se sert quelquefois dans les laboratoires du vase de Mariotte pour produire l'écoulement régulier d'un gaz, il suffit de se servir de l'eau qui s'écoule pour expulser le gaz. On peut aussi appeler le gaz par le tube même de Mariotte; dans ce cas, l'écoulement de l'eau est uniforme, mais il n'en est pas de même du gaz, puisque la pression varie. Toutefois il est bien évident qu'à partir de l'origine de l'expérience un même volume d'eau écoulé correspond à une même quantité de gaz, et c'est sous cette forme que l'expérience est quelquefois utilisée en physique.

CHALEUR

CHAPITRE XIX.

DU THERMOMÈTRE.

175. Chaleur. — Froid. — Les mots de *chaleur* et de *froid* correspondent à des sensations tellement connues, que toute explication à leur sujet serait superflue ; mais ces sensations sont d'un caractère évidemment personnel et pour ainsi dire subjectif. En effet, il n'est pas rare de voir une personne souffrir de la chaleur là où une autre se plaint du froid. C'est d'ailleurs pour la même personne une affaire de comparaison. Une température de 10° succédant en été à des jours très-chauds produit une sensation de froid très-prononcée, tandis qu'elle donne lieu en hiver à un phénomène inverse. On peut même, à cet égard, citer une ancienne expérience, qui est assez curieuse, quoique fort simple. Si, par exemple, on plonge les deux mains, l'une dans un vase contenant un mélange frigorifique, l'autre dans de l'eau à 50° environ, et si, après avoir laissé quelque temps les mains dans ces deux vases, on vient à les mettre simultanément dans de l'eau à 20°, on éprouve dans chacune d'elles une sensation différente. La main qui vient du mélange frigorifique éprouve une sensation de chaleur, celle qui vient de l'eau à 50° éprouve une sensation de froid ; pourtant elles sont dans le même milieu. Ceci indique évidemment que les sensations de chaleur et de froid sont comparatives et personnelles ; elles ne sauraient donc servir de guide sûr dans l'étude des phénomènes calorifiques, et c'est pour cette raison que les physiciens ont imaginé le thermomètre. Mais il n'est pas inutile de

remarquer à ce sujet que précisément à cause de l'*impersonnalité*, si on peut parler ainsi, du thermomètre, cet instrument ne peut donner qu'une idée infidèle et inexacte de la sensation, et qu'il y a lieu de tenir compte, à divers points de vue autres que le point de vue purement physique, de tous les éléments qui tendent à la former.

176. Température. — Si on place en présence les uns des autres plusieurs corps inégalement chauds, on reconnaît qu'il se produit entre eux une sorte de communication, en vertu de laquelle ils éprouvent des modifications inverses; les plus chauds se refroidissent, tandis que les plus froids s'échauffent; au bout d'un temps plus ou moins long, ces phénomènes inverses cessent de se produire, et les corps se constituent dans un état d'équilibre mutuel. On dit qu'ils sont à une même *température*. Si, à partir de ce moment, on fait agir sur eux une cause de réchauffement, on dit que leur *température augmente*; si on les abandonne à eux-mêmes dans un milieu plus froid, ils se refroidissent tous et on dit que leur *température diminue*. Le mot *température* désigne donc un certain état d'équilibre relativement aux causes physiques qui produisent les sensations de chaleur ou de froid. A partir d'un de ces états déterminés, dire que la température d'un corps augmente ou diminue, revient à dire que le corps s'échauffe ou se refroidit.

177. Dilatabilité. — En même temps que les corps éprouvent les changements de température dont nous venons de parler, et qui, à la rigueur, pourraient être constatés par des impressions diverses sur nos organes, il se produit en eux des modifications d'une nature plus précise, susceptibles d'être appréciées ou même mesurées, et qui peuvent servir au physicien à se rendre compte exactement des variations mêmes de la température. Ces modifications sont de natures fort diverses, et nous aurons l'occasion d'en parler dans la suite de ce traité; mais parmi elles il y en a une aussi générale qu'importante et qui sert presque exclusivement de base à l'étude des phénomènes calorifiques, c'est la variation de volume. En général, quand un corps s'échauffe, il augmente de volume; il diminue, au contraire, quand il se refroidit. La dilatabilité des corps, sous l'action de la chaleur, est une propriété entièrement générale que l'on peut démontrer par les expériences suivantes :

1° *Corps solides.* — On prend un anneau à travers lequel passe exactement une sphère de métal. Si l'on vient à chauffer cette dernière en la plaçant au-dessus d'une lampe à alcool, on reconnaît qu'après cette opération elle ne peut plus passer à travers l'anneau. Son volume a donc augmenté. Si on la plonge dans l'eau pour la refroidir, elle reprend son volume initial et peut passer de nouveau à travers l'anneau ; si, la boule étant chaude, on eût chauffé

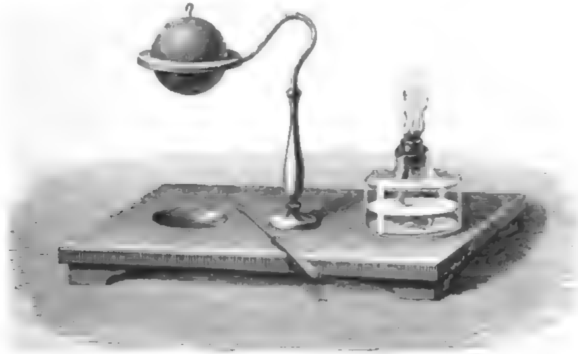


Fig. 182. — Anneau de 'S Gravesande.

l'anneau à peu près au même degré, la boule eût pu passer encore ; si enfin on chauffe à la fois et l'anneau et la boule, ils conservent toujours le même rapport de dimensions. Ce petit appareil porte le nom d'*anneau de 'S Gravesande.*

2° *Liquides.* — On introduit de l'eau, par exemple, dans l'appareil que montre la figure 183, de façon que le liquide remplisse à la fois le ballon et une portion du tube jusqu'en *a*. On plonge alors l'instrument dans un vase contenant de l'eau chaude, et on voit au premier moment l'extrémité de la colonne liquide descendre en *b*; mais l'expérience se prolongeant un peu, le liquide remonte d'abord jusqu'en *a*, et, finalement, jusqu'en un point *a'* plus ou moins élevé au-dessus. Ce double phénomène s'explique aisément. Le vase, recevant le premier l'impression de la chaleur, augmente de volume avant que la température du liquide ait pu changer sensiblement; ce dernier n'est donc plus capable de remplir la capacité totale du vase jusqu'au point de repère initial : on doit donc voir descendre l'extrémité de la colonne liquide. Mais le liquide subit à son tour l'impression de la chaleur, il se dilate par conséquent, et puisqu'il

dépasse le point initial, on doit en conclure que, non-seulement il se dilate, mais qu'il se dilate plus que le vase qui le renferme.

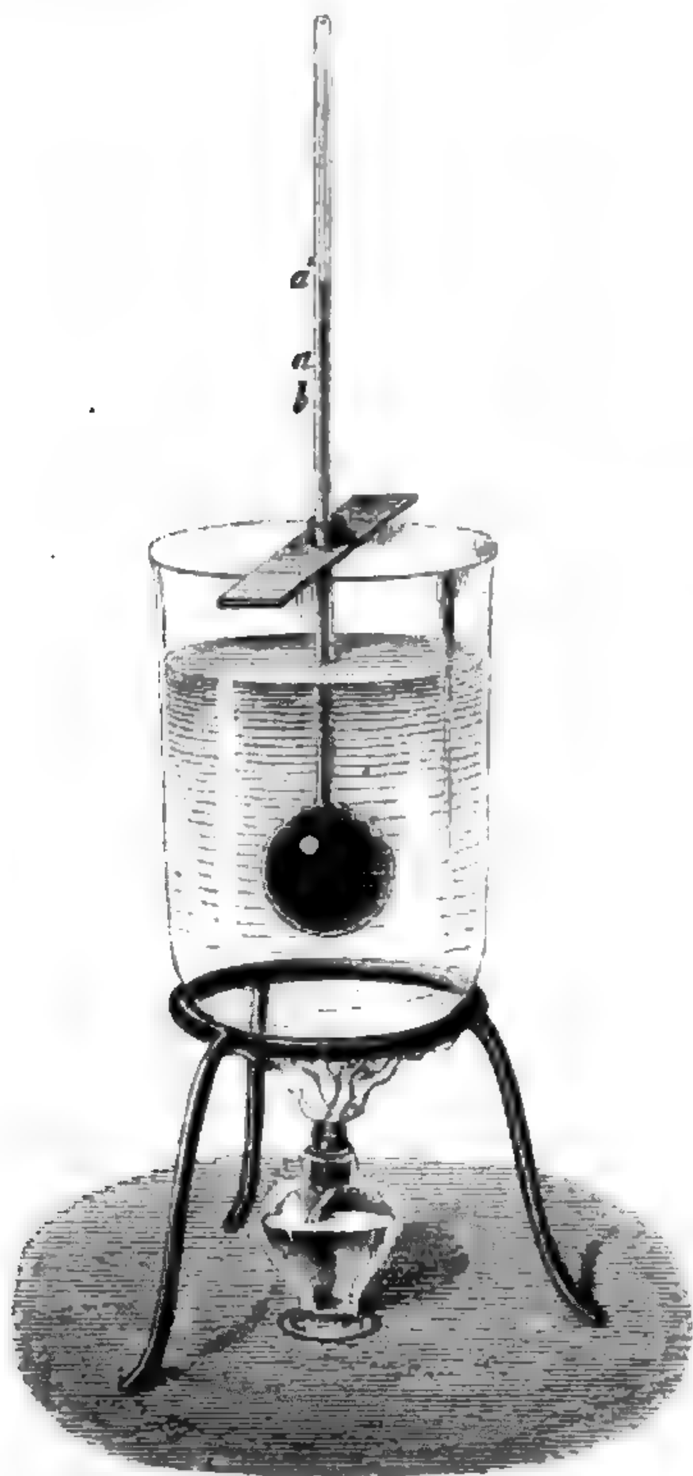


Fig. 183. — Dilatation des liquides.

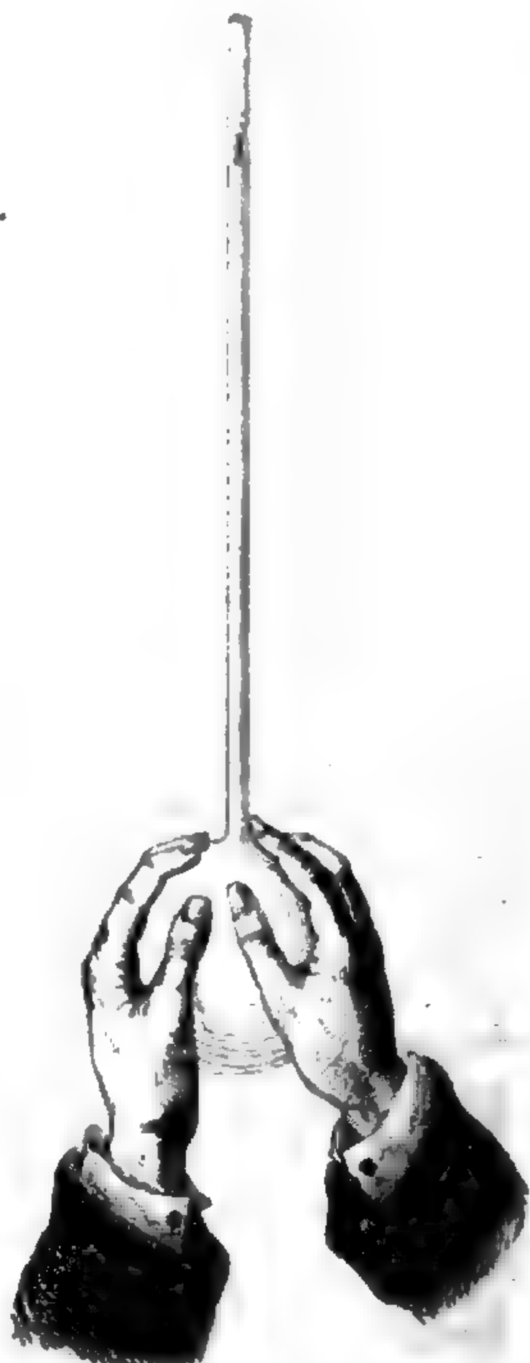


Fig. 184. — Dilatation des gaz.

3° *Gaz.* — Le ballon (fig. 184) contient de l'air, qui est séparé de l'air extérieur, par un petit index liquide. Il suffit dans ces conditions de chauffer le ballon avec les mains, pour voir l'index vivement repoussé vers le haut, ce qui montre que les gaz sont extrêmement dilatables.

178. Idée générale du thermomètre. — Il résulte de la propriété qui vient d'être démontrée, que, pendant qu'un corps éprouve des variations de température, il éprouve aussi des variations correspondantes de volume. Si l'on imagine que les divers volumes par lesquels il passe puissent être facilement reconnus, on pourra qualifier la température par l'expression du volume lui-même, et

en disant que le corps a un volume déterminé, on désignera, d'une manière précise, la température à laquelle il se trouve.

Mais ce corps n'accusera pas seulement ainsi sa propre température, il fera connaître également celle des corps au milieu desquels il se trouve, et qui sont en équilibre avec lui, c'est-à-dire qui n'éprouvent pas les changements inverses dont il a été question au § 176. Telle est l'idée la plus générale du thermomètre, que l'on peut définir : *un corps éprouvant sous l'action de la chaleur des variations de volume que l'on peût constater et mesurer.*

179. Choix de la substance thermométrique. — Une matière quelconque peut servir de matière thermométrique, et dans le fait il existe différents genres de thermomètres, fondés sur la dilatation de telle ou telle substance. Toutefois, pour que les indications thermométriques soient comparables entre elles, pour que leur signification soit constante relativement aux causes de la chaleur, les physiciens ont adopté un instrument type, auquel on rapporte les indications de tous les autres, c'est le *thermomètre à mercure*. Il est formé essentiellement, comme le montre la figure 185, d'un tube très-étroit, se terminant par un réservoir sphérique, cylindrique ou de toute autre forme. Du mercure remplit le réservoir et une portion du tube. Si la température vient à varier, le niveau du liquide s'élèvera ou s'abaissera dans le tube et s'arrêtera à des points faciles à reconnaître à l'aide d'une division et qui correspondent à des températures déterminées.



Fig. 185. Thermomètre à mercure.

Le choix du mercure, comme substance thermométrique, est d'ailleurs très-convenable. C'est un liquide qu'on peut se procurer facilement à l'état de pureté. Il est très-bon conducteur de la chaleur, et se met par suite rapidement en équilibre de température avec les corps qu'il touche. De plus, sa *capacité calorifique* est très-faible, de sorte que si on le met en contact avec un corps chaud, par exemple, aux dépens duquel il s'échauffe, celui-ci n'éprouve dans sa température qu'un changement très-petit et généralement négligeable.

180. Construction du thermomètre à mercure. — La construction d'un thermomètre à mercure est une opération très-minutieuse et très-délicate ; elle comprend diverses parties que nous allons successivement indiquer :

1° *Choix du tube.* — On doit d'abord se procurer un tube aussi régulièrement cylindrique que possible. Pour constater que cette condition est remplie, on fait pénétrer dans son intérieur une petite colonne de mercure, et on mesure la longueur qu'elle a dans ses diverses positions ; si ces longueurs étaient rigoureusement égales, c'est que le tube serait parfaitement cylindrique ; cela ne se rencontre pas généralement, et on se contente d'un résultat approché ; mais on doit rejeter les tubes dans lesquels on observerait de trop grandes différences de longueur. Quand on a un tube convenable, on soude, ou, ce qui est préférable en général, on souffle un réservoir à une de ses extrémités.

Quand il s'agit de thermomètre très-précis, on *calibre* à l'avance les tubes, c'est-à-dire qu'on les divise en parties d'égale capacité par des procédés particuliers.



Fig. 186. — Introduction du mercure dans le thermomètre.

2° *Introduction du mercure.* — On souffle à l'extrémité supérieure du tube une ampoule terminée par une pointe effilée ; on

chauffe légèrement l'ampoule et on plonge la pointe dans un vase contenant du mercure (fig. 186). L'air se refroidissant éprouve, à la fois, une diminution de volume et de pression, de sorte qu'en vertu de la pression atmosphérique une certaine quantité de mercure s'introduit dans l'ampoule. On ferme alors l'extrémité de la pointe pour se mettre à l'abri des vapeurs mercurielles, et on chauffe sur une grille à charbon ou à gaz (fig. 187), jusqu'à une température

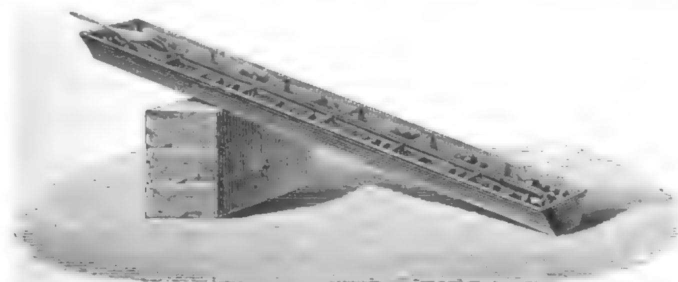


Fig. 187. — Grille à chauffer le thermomètre.

assez élevée, le réservoir et le tube encore vides. On chauffe ensuite le liquide de l'ampoule, et en redressant l'instrument, le mercure s'introduit partiellement dans le réservoir. On porte ensuite le liquide du réservoir jusqu'à l'ébullition, l'air est expulsé dans l'ampoule par les vapeurs mercurielles, et en redressant l'instrument, le mercure en se refroidissant s'introduit dans le réservoir et le remplit en entier. S'il restait toutefois quelque bulle d'air, ce qui est assez fréquent, on l'expulserait en répétant une ou plusieurs fois la même opération. On règle alors la quantité de mercure qu'on doit garder suivant les températures particulières que doit indiquer l'instrument, et après avoir détaché l'ampoule et effilé le tube, on ferme ce dernier à la lampe au moment où le mercure atteint son extrémité, de manière qu'il ne reste pas d'air dans l'intérieur. Cette précaution est importante, sans cela l'air pourrait diviser la colonne de mercure en différents tronçons qui ne se ressouderaient point, et par suite l'instrument ne pourrait plus servir.

3° *Détermination des points fixes.* — L'instrument, dans l'état où nous le supposons et muni d'une division sur sa tige, accuserait bien les variations de température, mais ses indications seraient

tout à fait arbitraires, et n'auraient aucun rapport avec celles des autres thermomètres.

Pour avoir des indications comparables, on se sert de deux températures fixes faciles à reproduire, à maintenir pendant un temps assez long, et on convient de les désigner par des nombres déterminés. Ces deux températures sont celles de la glace fondante et de l'eau bouillante. On a remarqué que, si l'on plonge le thermomètre dans la glace fondante, quelles que soient les circonstances dans lesquelles cette expérience s'accomplit, le mercure s'arrête invariablement au même point, et s'y maintient pendant tout le temps que dure la fusion. C'est donc une température fixe, on est convenu de l'appeler *zéro*.

Pour marquer le point 0 dans un thermomètre, on le plonge dans de la glace fondante; cette glace est contenue dans un vase percé de trous, de manière à donner issue à l'eau provenant de la fusion; lorsque le niveau du mercure ne varie plus, on trace avec un diamant très-fin un trait à l'endroit où le mercure se termine dans le tube, c'est le point zéro.



Fig. 188. — Détermination du zéro.

On a remarqué également que si on fait bouillir de l'eau dans un vase métallique ouvert, sous la pression extérieure de 760 millimètres, et qu'on plonge le thermomètre dans la vapeur, le mercure se maintient au même point pendant tout le temps que dure l'ébullition, pourvu que la pression extérieure ne change pas. On appelle 100 *degrés* cette seconde température fixe. Pour marquer ce second point sur le thermomètre, on se sert de l'appareil indiqué par Gay-Lussac et perfectionné par M. Regnault. C'est une chaudière en cuivre (fig. 189) contenant de l'eau que l'on porte à l'ébullition à l'aide d'un foyer. La vapeur circule dans une double enveloppe et s'échappe par un tube placé à la partie inférieure de l'appareil. On place le thermomètre dans l'enveloppe intérieure et lorsque le mercure est devenu

stationnaire, on marque un trait au point où il s'arrête, c'est la température de 100°. Il n'y a plus ensuite qu'à diviser l'instrument entre 0 et 100 en 100 parties égales et à prolonger la division au

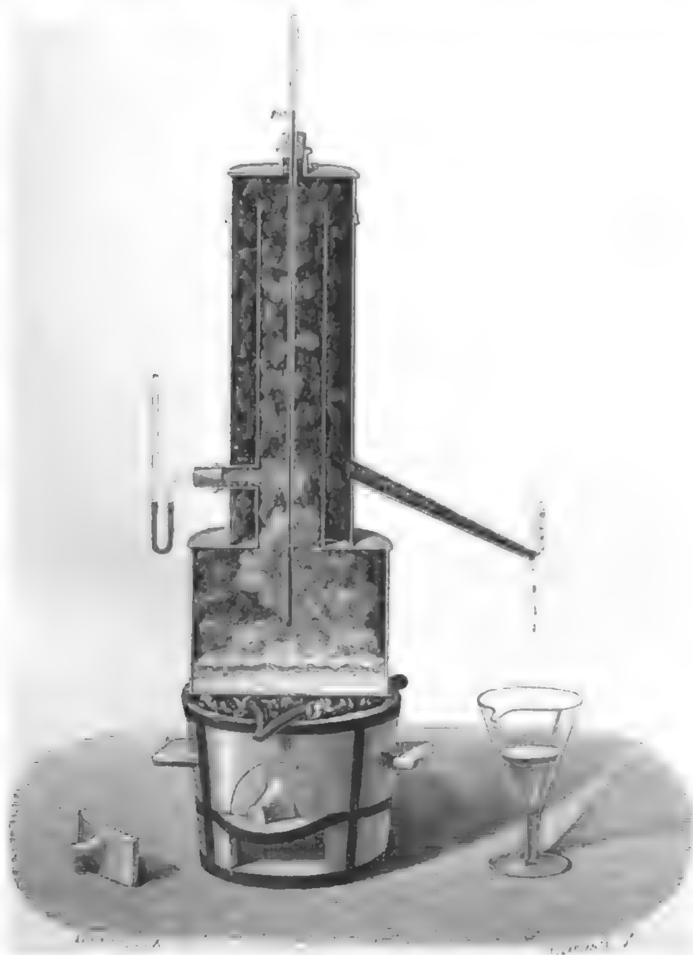


Fig. 189. — Appareil pour la détermination du point 100.

delà des deux points fixes. Au-dessous de zéro on place les nombres 1, 2, 3, etc. Ces températures s'expriment ordinairement par le signe —. Ainsi la température de 17° au-dessous de zéro s'écrit — 17°.

Un petit tube manométrique sert à montrer, par l'égalité du niveau du liquide dans ses deux branches, que l'ébullition se fait

bien sous la pression extérieure, et par suite que l'issue donnée à la vapeur est suffisante. Il doit arriver d'ailleurs très-souvent que cette pression n'est pas égale à 760 millimètres; dans ce cas le point 100 doit être placé un peu au-dessus ou au-dessous du point où le mercure s'arrête, suivant que la pression est plus petite ou plus grande que la pression normale. Lorsque la différence est peu considérable dans un sens ou dans l'autre, on calcule la position du point 100 d'après ce principe, qu'une différence de pression de 26mm,6 en plus ou en moins de la pression normale donne lieu à une différence de 1° dans la température de l'ébullition de l'eau. Nous reviendrons sur ce fait dans le chapitre XXVI.

181. Réglage de la quantité de mercure. — Pour ne pas compliquer l'explication précédente, nous avons laissé de côté une opération fort importante et qui doit précéder toutes les autres; c'est la détermination du volume du réservoir pour que l'instrument puisse marquer des températures comprises entre deux limites données à l'avance. Lorsque le réservoir est cylindrique, cette opération se fait très-simplement de la manière suivante. Supposons que l'on veuille que le thermomètre marque les températures comprises entre — 20° et 130°; on laisse le réservoir ouvert en O (fig. 190), par cette ouverture on le remplit de mercure et on le ferme à la lampe. On plonge alors l'instrument dans deux bains, dont les températures diffèrent de 50° par exemple, l'extrémité de la colonne parcourt dans ces circonstances la longueur *m'm*; cette longueur devrait être, si la quantité de mercure était celle qui convient, le tiers de la longueur de la tige. Mais comme on prend toujours le réservoir primitif trop grand, de façon qu'il n'y ait qu'à le réduire, cette longueur *mm'* est plus grande que le tiers; elle est, je suppose, égale aux 3/4 de la tige. Les degrés seraient donc trop longs dans le rapport de $\frac{3}{4}$ à $\frac{1}{3} = \frac{9}{4}$. Cela veut dire que le réservoir est lui-même les 9/4 de ce qu'il devrait être. On prend donc à partir de l'origine de la tige les $\frac{4}{9}$ de la longueur, qu'on marque par un trait, on casse l'extrémité O et on vide le mercure. On ramollit alors le verre au



Fig. 190.

trait marqué, et on arrête ainsi la dimension du réservoir. Il ne reste plus ensuite dans la construction qu'à conserver dans le tube la quantité de mercure convenable pour que la colonne, à une température déterminée, s'arrête au point du tube qui, d'après l'amplitude que l'on veut obtenir, correspond à cette température.

Si le réservoir était sphérique, ce qui est en général peu avantageux pour les thermomètres précis, ce procédé ne serait pas applicable, et il faudrait essayer successivement des réservoirs de différents volumes.

182. Échelles thermométriques. — La division en 100 parties égales de l'intervalle compris entre la glace fondante et l'eau bouillante constitue l'échelle *centigrade*. Dans l'échelle *Réaumur* employée encore quelquefois, le zéro correspond toujours à la fusion de la glace, mais la température de l'eau bouillante est marquée 80.

Pour convertir une indication centigrade en indication Réaumur ou *vice versa*, il suffit de remarquer que 80° Réaumur valant 100° centigrades, un degré Réaumur vaut les 5/4 d'un degré centigrade, et par suite un degré centigrade vaut les 4/5 d'un degré Réaumur. Il faut donc au nombre de degrés centigrades ajouter le quart pour avoir le nombre correspondant de degrés Réaumur, et du nombre de degrés Réaumur retrancher le cinquième pour avoir le nombre correspondant de degrés centigrades.

Ainsi $75^{\circ c} = 75 - 15 = 60^{\circ R}$.
$36^{\circ R} = 36 + 9 = 45^{\circ c}$.



Fig. 101. — Échelles thermométriques.

On se sert fréquemment aussi, particulièrement en Angleterre, de l'échelle Fahrenheit, dans laquelle la glace fondante est marquée 32, l'eau bouillante 212, et l'intervalle entre ces deux points divisé en 180 parties égales. Le zéro de cette échelle correspond à la température d'un mélange refrigérant de glace et de sel ammo-

niac; le centième degré à peu de chose près a la température de l'intérieur du corps humain. Le degré Fahrenheit vaut les 5/9 d'un degré centigrade, qui lui à son tour vaut les 9/5 d'un degré Fahrenheit; à l'aide de cette remarque et en tenant compte de la différence d'origine, on convertira aisément une température Fahrenheit en température centigrade ou réciproquement. Ainsi, par exemple, $100^{\circ F}$ font $68^{\circ F}$ au-dessus de la glace fondante, ou $68 \times \frac{5}{9} = 37^{\circ C},9$.

183. Dilatation apparente du mercure. — Degré du thermomètre. — Les indications du thermomètre à mercure sont fondées non pas sur la dilatation véritable du mercure, mais sur sa dilatation *apparente*, c'est-à-dire sur la différence entre sa propre dilatation et celle du verre. Il importe de connaître la valeur de cette dilatation apparente pour se faire une idée exacte de ce que signifie un degré du thermomètre. A cet effet, supposons que l'on ait un tube thermométrique (fig. 192) divisé en parties d'égale capacité, et que l'on ait par un jaugeage convenable déterminé à quel nombre de ces divisions correspond le volume du réservoir; soit N ce nombre. On introduit du mercure dans l'appareil, on l'entoure de glace fondante, et l'on trouve que la colonne liquide s'arrête à la division n; le nombre de divisions occupées par le mercure à zéro est donc $N + n$. On porte ensuite l'appareil à 100°, le mercure monte et atteint la division n', l'accroissement apparent de volume a donc été de $n' - n$ divisions, et par suite l'accroissement proportionnel relatif à l'unité de volume est $\frac{n' - n}{N + n}$. La centième partie de cette quantité correspond au degré du thermomètre. En faisant l'expérience, on trouve des nombres qui varient un peu, suivant la nature du verre employé, mais qui ne s'écartent pas beaucoup en général du nombre $\frac{1}{6480}$. On voit donc que si à partir de zéro on observe soit au-dessus, soit au-dessous de ce point, la variation du volume du mercure dans le verre, en ne tenant pas compte de la dilatation



Fig. 192.

de celui-ci, chaque variation qui atteindra $\frac{1}{6480}$ du volume à zéro correspondra à un degré du thermomètre.

184. Comparabilité des thermomètres à mercure.—Ceci nous permet d'examiner l'importante question de savoir si les différents thermomètres sont comparables entre eux, c'est-à-dire, si placés dans les mêmes conditions, ils doivent marquer la même température. Cela ne ferait aucun doute dans le cas où le verre employé pour leur construction serait absolument le même et donnerait, par exemple, une dilatation apparente de $\frac{1}{6480}$ par degré. Car dire qu'un thermomètre marque T degrés, cela veut dire que le mercure s'est accru de T fois la 6480ᵉ partie de son volume à zéro, il en sera de même évidemment pour tous les thermomètres placés dans les mêmes conditions, qui marqueront tous par conséquent T degrés. La concordance serait encore rigoureuse, quand bien même les dilatations apparentes dues aux verres employés ne seraient pas les mêmes, pourvu que ces dilatations conservassent le même rapport aux diverses températures; mais il n'en est pas ainsi, et les différents verres ont chacun un mode spécial de dilatation. On peut donc prévoir que les indications des thermomètres construits avec des verres différents pourront n'être pas dans un parfait accord. L'expérience seule peut d'ailleurs nous apprendre si ce désaccord a lieu en effet, et dans quelle mesure il se produit. Or il résulte des travaux de M. Regnault sur ce point, que ce désaccord est à peu près nul ou du moins tout à fait négligeable jusqu'à 300°; au delà on observe une petite différence qui peut s'élever au plus à 3° ou 4° vers 350°, c'est-à-dire à la limite de l'emploi du thermomètre à mercure.

Si léger que soit ce défaut de comparabilité des thermomètres, il faut l'attribuer aux irrégularités de dilatation de l'enveloppe. L'influence de ces irrégularités serait naturellement moins sensible avec une matière plus dilatable que le mercure; c'est ce qui explique l'emploi dans les expériences de grande précision des thermomètres à air, qui peuvent d'ailleurs servir jusqu'aux températures les plus élevées, tandis que le mercure ne peut plus être employé au delà de 350°, température de son ébullition.

185. Déplacement du zéro. — Un thermomètre abandonné à lui-même après sa construction éprouve graduellement une altération particulière qui se manifeste par une élévation successive du zéro. Ce phénomène est dû à un travail moléculaire dans l'intérieur du verre qui a subi une sorte de trempe dans la construction de l'instrument. Il s'arrête au bout d'un certain temps, quinze ou dix-huit mois, il ne donne jamais lieu d'ailleurs qu'à un déplacement assez faible et qui n'atteint pas un degré. Il convient toutefois, dans les expériences précises, de vérifier la position du zéro dans le thermomètre dont on se sert, et de tenir compte dans l'évaluation des températures du petit déplacement qu'il peut avoir éprouvé.

186. Sensibilité du thermomètre. — La sensibilité du thermomètre dépend du volume du réservoir par rapport au tube; plus ce volume sera grand, pour une même section du tube, plus la longueur du degré sera considérable. D'autre part, s'il s'agit d'observer la température d'un milieu tel que l'air où elle varie plus ou moins vite, il convient que le réservoir soit très-petit, sans quoi l'équilibre serait long à s'établir entre le milieu et le thermomètre, et, pendant ce temps, la température que l'on veut observer pourrait avoir déjà éprouvé un changement appréciable. Il faudra donc dans ce cas, pour que le thermomètre soit fidèle, que le tube soit extrêmement fin.

Quand on voudra, au contraire, mesurer la température d'une masse liquide, par exemple, dans des conditions telles que cette température se maintient à peu près constante, on pourra utilement employer un thermomètre à gros réservoir et particulièrement le thermomètre à poids dont nous allons parler un peu plus loin. Il faut remarquer encore que le thermomètre ne se mettant en équilibre de température avec les corps que par suite d'une variation inverse correspondante dans la température de ces derniers, il faudra, quand la masse du corps à étudier sera petite, que le thermomètre soit extrêmement petit lui-même pour qu'il ne fasse pas varier la température à mesurer d'une manière sensible.

187. Thermomètre à poids. — Dans ce thermomètre, qui est assez fréquemment employé dans les recherches de physique à la place du thermomètre à tige, la tige est supprimée et le mercure

que contient le réservoir s'écoule dans une petite coupe où on le recueille ; du poids du mercure sorti on déduit la température. Soit en effet P le poids du mercure qui remplit l'appareil à zéro et π le poids qui en sort quand on le porte dans l'étuve pour la détermination du point 100. Le rapport $\frac{\pi}{P-\pi}$ représente évidemment la dilatation apparente de 0 à 100°, et, par suite, le degré a pour valeur la centième partie de cette dilatation, c'est-à-dire $\frac{\pi}{100(P-\pi)}$.



Fig. 193. Thermomètre à poids.

Supposons actuellement que l'instrument renfermant de nouveau à 0 le poids P de mercure soit porté dans un bain dont on veut connaître la température et qu'il s'écoule un poids p de métal. La dilatation apparente totale est $\frac{p}{P-p}$, et en la divisant par la valeur du degré, on aura la température cherchée, qui se trouve ainsi exprimée par la formule

$$T = \frac{p}{P-p} : \frac{\pi}{100(P-\pi)} = 100\,\frac{p}{\pi}\cdot\frac{P-\pi}{P-p}.$$

188. Thermomètre à alcool. — On peut employer d'autres liquides que le mercure à la construction du thermomètre et particulièrement l'alcool ; mais ce liquide n'ayant pas évidemment la même loi de dilatation, le thermomètre à alcool fournira des indications qui ne s'accorderont pas avec celles du thermomètre à mercure, et il ne pourra le remplacer que dans le cas où il aurait été gradué comparativement avec lui. Le thermomètre à alcool présente d'ailleurs des irrégularités propres qui tiennent aux différences considérables qui peuvent exister entre les alcools de diverses provenances qui sont employés à sa construction.

Au-dessous de — 39°, le mercure se congelant, le thermomètre à mercure ne peut plus servir. L'alcool, ne se solidifiant à aucune température connue jusqu'à présent, peut être employé dans ces circonstances, mais il est clair que ses indications ont alors une valeur propre et indépendante de celles du thermomètre à mercure, qui n'existe plus à proprement parler dans ce cas.

189. Thermomètres à maxima et à minima. — Il est souvent

utile, dans les observations météorologiques, de connaître la température *maxima* ou *minima* qui s'est produite pendant un intervalle de temps plus ou moins long; on se sert à cet effet d'instruments de formes diverses parmi lesquels nous citerons les deux suivants :

Thermomètre à maxima. — Il se compose d'un thermomètre à mercure placé horizontalement et présentant une légère cour-

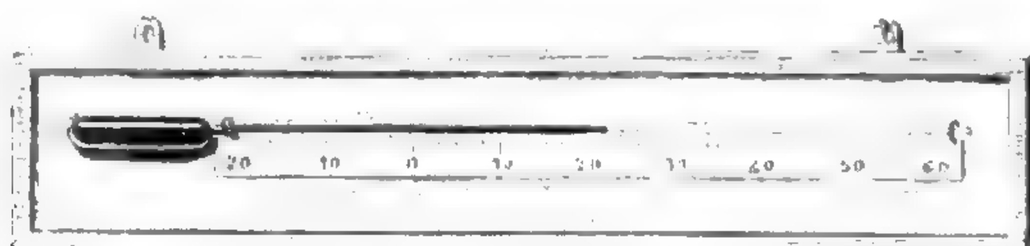


Fig. 194. — Thermomètre à maxima.

bure dans la tige à une petite distance du réservoir. En ce point se trouve un petit cylindre d'émail qui est comme arrêté par le coude, mais qui n'interrompt pas toutefois la continuité de la colonne liquide. Quand la température s'élève, la dilatation s'accomplit sans rien de particulier; mais quand elle s'abaisse, grâce à la courbure et au petit index, la colonne se coupe en ce point, et le mercure reste par conséquent dans le tube à l'endroit où il a été poussé par la température la plus élevée. Quand on veut remettre l'instrument en expérience, on le redresse verticalement, et, à l'aide d'une petite secousse, on réunit les deux parties de la colonne mercurielle.

Thermomètre à minima de Rutherford. — C'est un thermomètre à alcool placé aussi horizontalement; dans l'intérieur du liquide

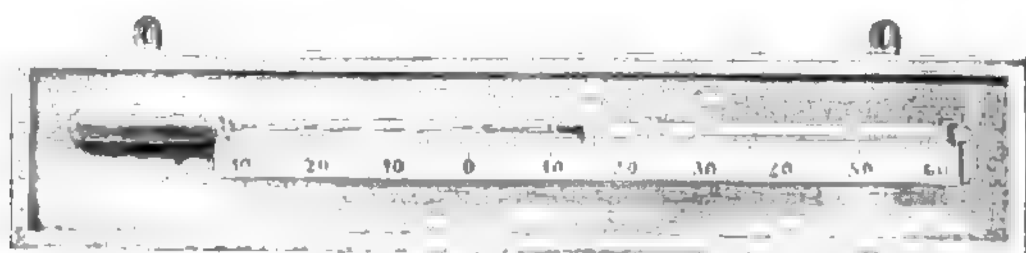


Fig. 195. — Thermomètre à minima.

se trouve un petit cylindre d'émail qui est entouré d'alcool et ne gêne en aucune façon sa dilatation. Mais lorsque celui-ci se contracte, et que son extrémité vient à toucher l'index, la surface oppose une résistance suffisante à la sortie de l'index ; celui-ci se trouve par conséquent ramené au point correspondant à la tempé-

rature la plus basse. Pour régler l'instrument, on l'incline de manière que l'index vienne toucher l'extrémité de la colonne.

190. Thermomètre à déversement de Walferdin. — Cet instrument est particulièrement destiné à l'exploration de la température des couches terrestres dans les opérations de sondage; il présente à la partie supérieure un réservoir de déversement contenant une certaine quantité de mercure et dans lequel le tube thermométrique se termine en pointe. Quand on veut faire une expérience, on incline le tube de façon à mettre la pointe en communication avec le mercure; on chauffe un peu, ce qui amène le mercure du tube en contact avec celui du réservoir; on laisse alors refroidir et on place le thermomètre dans un bain dont la température est connue, 10° par exemple. Quand l'équilibre est établi, on redresse l'instrument, et, à l'aide d'une petite secousse, on détache la petite goutte de mercure qui adhère à la pointe. L'instrument ainsi préparé est porté dans le lieu dont on veut connaître la température, laquelle doit être d'ailleurs supérieure à 10°. Lorsqu'on le ramène et qu'on le plonge dans le même bain qui a servi à le régler, la tige n'est plus remplie de mercure; il manque un certain nombre de divisions, qui fait connaître ce qu'il faut ajouter à 10° pour avoir la température cherchée. On pourrait se dispenser de régler l'instrument à une température bien déterminée; il suffirait seulement qu'elle fût inférieure à celle qui doit être explorée. On chercherait ensuite, par le tâtonnement, la température qui produit le remplissage complet du tube; ce serait évidemment la température cherchée.



Fig. 196. Thermomètre à maxima de Walferdin.

191. Thermomètres métalliques. — On a aussi employé les métaux solides à faire des thermomètres; le thermomètre d'Abraham Breguet est un des plus connus. Il se compose (fig. 197) d'une lame contournée en spirale, et dont la partie inférieure supporte une aiguille horizontale, au-dessous de laquelle est un cadran divisé. La lame est composée de trois rubans, d'argent, d'or et de platine. L'argent, le plus dilatable, est placé à l'intérieur, le platine à l'extérieur, l'or sert de soudure. Si la température augmente, la

spirale se déroule; elle s'enroule, au contraire, si la température diminue. Ces mouvements sont accusés par l'aiguille qui se meut sur le cadran dans un sens ou dans un autre.

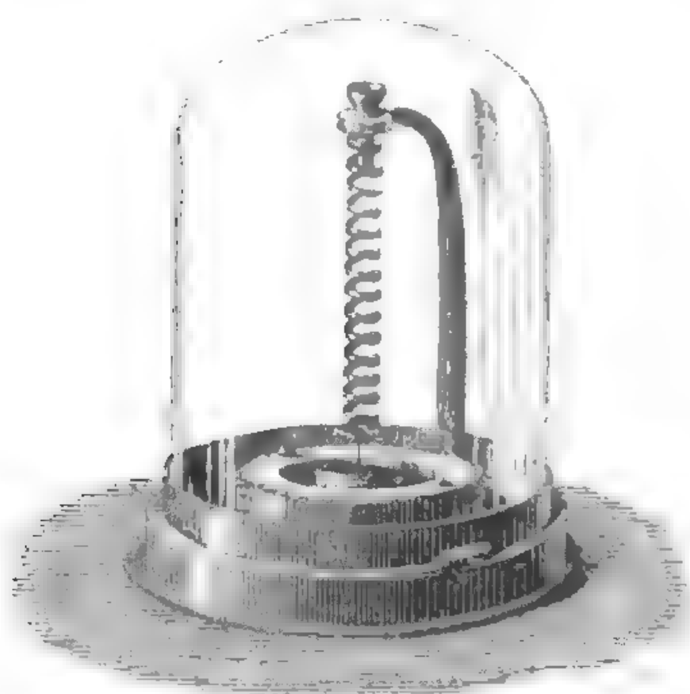


Fig. 197. — Thermomètre de Breguet.

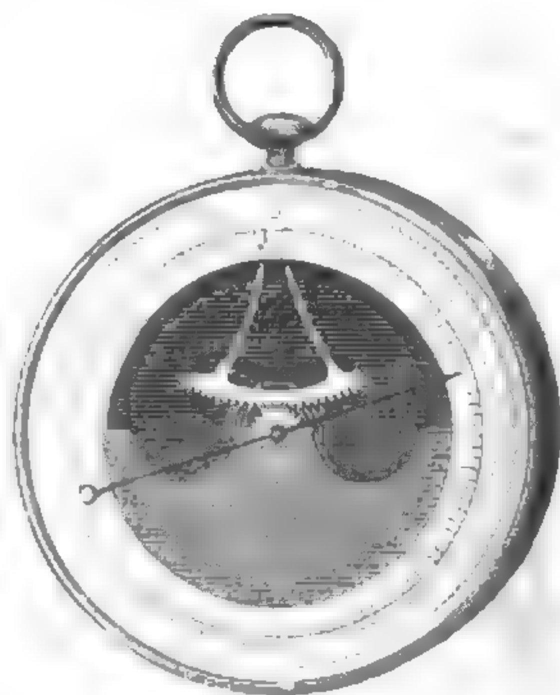


Fig. 198. — Thermomètre métallique.

La figure 198 représente un autre thermomètre à cadran qui a été assez répandu autrefois, avec des formes légèrement variables toutefois de la lame métallique. Dans celui que nous représentons, l'organe thermométrique est une double lame d'acier et de laiton, ayant la forme circulaire. L'une des extrémités est fixée invariablement, l'autre s'articule avec un levier dont la longue branche se termine par un secteur denté. Ce dernier engrène avec un pignon qui porte l'aiguille.

On remarquera que les thermomètres à cadran pourraient indiquer très-aisément les températures maxima et minima, il suffirait de placer, de part et d'autre de l'aiguille, des index mobiles que celle-ci pousserait alternativement dans un sens et dans l'autre, suivant les variations de la température.

Les thermomètres métalliques se prêtent très-bien à l'enregistrement de leurs indications, et on peut dire que c'est à leur emploi, comme thermométrographes, qu'ils doivent d'avoir été tirés de l'oubli où ils étaient depuis longtemps.

Dans le météorographe du père Secchi, par exemple, la température est indiquée et enregistrée par la dilatation d'un long fil de laiton (17 mètres environ) tendu constamment par un poids conve-

nable ; cette dilatation est rendue sensible par un système de leviers qui sont en rapport avec l'organe traceur.

Le thermométrographe de MM. Hasler et Escher est formé par une bande d'acier et une bande de laiton soudées ensemble et enroulées en spirale. L'extrémité de la spirale est en communication avec un levier recourbé, lequel est fixé lui-même à un axe en acier, sur lequel se trouve établi le système traceur.

192. Pyromètre de Brongniart. — Les métaux pouvant supporter de très-hautes températures sans fondre, peuvent être employés à la construction des pyromètres. Brongniart avait installé à la manufacture de Sèvres celui que représente notre figure.

Une barre de fer est placée dans une rainure que porte une plaque de porcelaine placée dans le four. Elle s'appuie d'un côté sur le fond invariable de la rainure, et de l'autre elle pousse une barre de porcelaine qui passe à travers une ouverture pratiquée dans la paroi du fourneau. Par l'intermédiaire d'un levier à engrenages, ce mouvement est transmis à une aiguille qui parcourt les divisions d'un cadran.

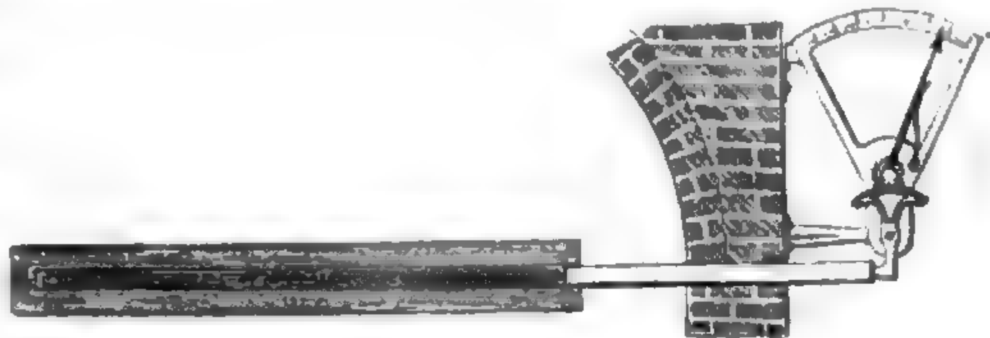


Fig. 199. — Pyromètre de Brongniart.

Dans les expériences précises, ce sont surtout les gaz qui sont employés comme substances pyrométriques.

193. Thermomètre différentiel. — Leslie, célèbre physicien écossais, a imaginé, dans le commencement de ce siècle, un instrument ingénieux qui permet de mesurer de petites variations de température. Une colonne d'acide sulfurique coloré en rouge est introduite dans un tube deux fois recourbé, terminé à ses deux extrémités par deux boules égales (fig. 200). Le liquide remplit la partie horizontale du tube et s'élève dans les portions verticales.

Lorsque l'air contenu dans les deux boules est à la même température, quelle qu'elle soit d'ailleurs, si l'instrument est bien réglé, le liquide s'élève à la même hauteur dans les branches verticales en deux points où l'on marque zéro. L'une des boules étant

maintenue à une certaine température, si on élève la température de l'autre de 5° par exemple, la colonne s'élèvera du côté de la boule froide jusqu'en *a*, tandis qu'elle descendra de l'autre côté en *b*. Admettons qu'on divise en dix parties égales l'espace parcouru par le liquide, chaque division vaudra 1/4 de degré.

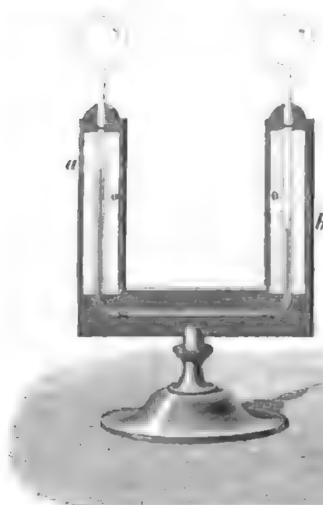


Fig. 200. — Thermomètre différentiel de Leslie.

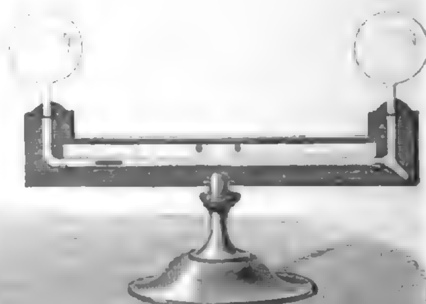


Fig. 201. — Thermoscope de Rumford.

On reproduit cette division sur chaque branche de part et d'autre du zéro.

Le thermomètre différentiel est très-sensible, il a permis à Leslie de faire des déterminations très-délicates sur le rayonnement de la chaleur. Aujourd'hui toutefois il est à peu près oublié et remplacé par le thermomètre électrique de Melloni. Nous décrirons plus loin ce dernier instrument. Le thermoscope de Rumford (fig. 201) est un instrument analogue au thermomètre différentiel; il en diffère en ce que la branche horizontale est beaucoup plus longue et les branches verticales plus courtes. Dans la branche horizontale se trouve un index d'alcool qui, lorsque les deux boules sont à la même température, en occupe exactement le milieu. Si la température de l'une des boules augmente, l'index se déplace et on divise le chemin qu'il parcourt en un certain nombre de parties égales.

CHAPITRE XX.

FORMULES DE DILATATION.

194. Binome de dilatation. — Pour exprimer numériquement la valeur de la dilatation d'une substance, on rapporte cette dilatation à l'unité. Ainsi, par exemple, on dira qu'entre la température de zéro et celle de 100°, le volume du verre augmente de 0,002; c'est-à-dire qu'un volume de 1 litre à zéro s'accroît, de 0 à 100°, d'une quantité égale à 2/1000 de litre, c'est-à-dire à 2 centimètres cubes. Pour connaître dans les mêmes circonstances l'accroissement d'un volume quelconque V, il est évident qu'il faudra multiplier ce volume par 0,002. Si on désigne en général par m la dilatation ainsi exprimée entre 0 et t, par V le volume à zéro et V' le volume à t°, on aura évidemment la relation

$$V' = V + Vm,$$
$$V' = V(1 + m). \qquad (1)$$

On donne souvent à la quantité $1 + m$, qui joue un rôle continuel dans les calculs relatifs aux dilatations, le nom de *binome* ou *module de dilatation*.

On peut donc énoncer l'équation (1) en disant que quand on connaît le volume d'un corps à zéro, pour avoir ce volume à une température quelconque, il faut *multiplier le volume à zéro par le binome de dilatation*.

195. Coefficient de dilatation. — Il arrive souvent que les accroissements successifs de volume que prend un corps à partir de zéro sont, du moins dans de certaines limites, égaux entre eux; on dit dans ce cas que la dilatation est *uniforme*. Si l'on appelle K l'ac-

croissement de l'unité de volume de 0 à 1°, l'accroissement m de 0 à $t°$ sera égal à K t, et par suite la formule (1) devient

$$V' = V\ (1 + Kt). \qquad (2)$$

La quantité $1 + Kt$ s'appelle toujours binome de dilatation, et K est le coefficient de dilatation.

On peut donc définir le coefficient de dilatation, l'*accroissement de l'unité de volume d'un corps de 0 à 1°.*

On voit d'après cette définition que la valeur numérique du coefficient de dilatation dépend, à la fois, et de la valeur du degré et de la température qui sert de point de départ. Ordinairement en physique on prend pour origine la température zéro.

196. Applications des formules. — I. Trouver le volume qu'occuperont à 50 degrés 75 litres d'alcool à 0, la dilatation entre ces deux limites étant égale à 1/18. La formule (1) donne

$$V' = 75\left(1 + \frac{1}{18}\right) = \frac{75 \times 19}{18} = 79^{\text{lit}},166.$$

II. Un vase de verre a à zéro un volume de 450 centimètres cubes, on demande ce que sera ce volume à 80°, le coefficient de dilatation du verre étant 0,00002. La formule (2) donne

$$V' = 450\,(1 + 80 \times 0{,}00002) = 450^{\text{cc}},72.$$

197. Dilatation cubique, linéaire, superficielle. — Lorsque un corps solide se dilate, on peut considérer, en particulier, l'accroissement de longueur d'une des dimensions linéaires du corps : c'est ce que l'on appelle la *dilatation linéaire.* L'accroissement de superficie d'une portion quelconque de la surface s'appelle de même *dilatation superficielle.*

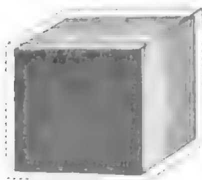


Fig. 202.

En exprimant ces dilatations suivant la règle indiquée (194), on peut démontrer les deux propositions suivantes :

1° La dilatation cubique est égale à trois fois la dilatation linéaire.

2° La dilatation superficielle est égale à deux fois la dilatation linéaire.

Soit, en effet (fig. 202), un cube d'une substance quelconque, et supposons qu'à zéro l'arête de ce cube ait pour longueur l'unité; le volume est, par conséquent, égal à 1, et la surface d'une quelconque des faces est aussi représentée par 1. Si l'on porte le corps à une température quelconque t, chacune des arêtes s'accroissant d'une certaine quantité l, les faces du cube auront pour surface

$$(1+l)^2 = 1 + 2l + l^2,$$

et le volume du corps sera

$$(1+l)^3 = 1 + 3l + 3l^2 + l^3.$$

Or le nombre l, qui représente la dilatation linéaire, est toujours très-petit, de sorte qu'on peut, sans erreur notable, négliger son carré et son cube devant sa première puissance. On voit donc que l'accroissement de superficie de l'une des faces du cube est sensiblement égal à $2l$, et l'accroissement de volume du cube sensiblement égal à $3l$, ce qui est l'expression même des propositions à démontrer. Ces propositions s'appliquent évidemment aux coefficients de dilatation ; on peut donc dire que *le coefficient de dilatation linéaire est égal au tiers du coefficient de dilatation cubique et à la moitié du coefficient de dilatation superficielle.*

La démonstration précédente suppose que le corps en se dilatant demeure semblable à lui-même, ce qui n'a lieu qu'autant qu'il est homogène et non cristallisé. Dans les cristaux, la dilatation varie d'une direction à l'autre, suivant des règles variables avec le système cristallin.

198. Formules diverses. — On peut des équations (1) et (2) tirer la valeur de V à l'aide de celle de V', ce qui donne

$$V = \frac{V'}{1+m}, \qquad (3)$$

$$V = \frac{V'}{1+Kt}, \qquad (4)$$

ce qui veut dire que quand on connaît le volume d'un corps à une certaine température, pour savoir ce que devient ce volume à zéro, il faut *diviser le premier volume par le binome de dilatation.*

Les formules (1), (2), (3) et (4) sont des cas particuliers d'une formule plus générale. Soient V et V' les volumes d'un même

corps aux températures t et t', U le volume à zéro, K le coefficient de dilatation si la dilatation est uniforme, et dans tous les cas m et m' les dilatations de 0 à t et à t'. On aura, d'après les formules (1) et (2),

$$V = U(1+m) = U(1+Kt),$$
$$V' = U(1+m') = U(1+Kt'),$$

d'où, en divisant membre à membre,

$$\frac{V}{V'} = \frac{1+m}{1+m'} = \frac{1+Kt}{1+Kt'}. \qquad (5)$$

Ce qui veut dire que *les volumes d'un même corps à diverses températures sont proportionnels aux binomes de dilatation.*

Les formules précédentes sont évidemment applicables aux dilatations linéaires et superficielles.

199. Influence de la température sur la densité. — Le volume d'un corps variant avec la température, il est clair que la densité éprouve une variation inverse. La connaissance de la dilatation permet de trouver la valeur de la densité à une température quelconque, lorsque cettedensité est connue à une température déterminée.

Soit D la densité, c'est-à-dire le poids de l'unité de volume d'une substance à la température de zéro; si la température s'élève à t; l'unité de volume devient $1 + m$ ou $1 + Kt$, son poids d'ailleurs ne change pas. Si donc on appelle D' la densité à cette température t, on devra avoir

$$D = D'(1+m) = D'(1+Kt). \qquad (6)$$

d'où on déduit

$$D' = \frac{D}{1+m} = \frac{D}{1+Kt}. \qquad (7)$$

En général, soient D et D' les densités d'un corps aux températures t et t'; si D_0 désigne cette densité à la température de zéro, on aura, d'après ce qui précède,

$$D = \frac{D_0}{1+m} = \frac{D_0}{1+Kt},$$
$$D' = \frac{D_0}{1+m'} = \frac{D_0}{1+Kt'},$$

d'où, en divisant membre à membre,

$$\frac{D}{D'} = \frac{1 + m'}{1 + m} = \frac{1 + Kt'}{1 + Kt}. \qquad (8)$$

ce qui veut dire que *les densités d'un corps à deux températures différentes sont inversement proportionnelles aux binomes de dilatation.*

200. Correction des densités des solides et des liquides. — Le gramme, une des unités fondamentales de notre système métrique, est le poids d'un centimètre cube d'eau pure à 4°. A toute autre température, un centimètre cube d'eau pèse un peu moins d'un gramme. En général, si e représente la dilatation de l'eau de 4° à la température considérée, le poids du centimètre cube d'eau à cette température sera $\frac{1}{1+e}$. Or, dans les méthodes ordinaires de détermination de la densité des solides et des liquides, on obtient comme résultat le rapport du poids du corps à la température à laquelle on opère, au poids d'un égal volume d'eau à cette même température. Soit d ce rapport, il suit de la remarque précédente que le poids de l'unité de volume du corps à la température considérée est $d\frac{1}{1+e}$, et par suite le poids d_0 du même volume du corps à la température de zéro est

$$d_0 = \frac{d(1 + m)}{1 + e} = \frac{d(1 + Kt)}{1 + e}.$$

Cette quantité d_0 est donc un nombre spécifique et invariable qui représente exactement la densité du corps à la température de zéro. C'est ce nombre qui est, en général, inscrit dans les tables de densités que l'on trouve dans les traités de physique. Il est bon de remarquer toutefois qu'en ce qui tient aux corps solides, les différents états sous lesquels on peut les rencontrer correspondent à des variations de densité d'un ordre tout au moins comparable, sinon supérieur à la valeur de la correction précédente, qui devient dès lors d'une importance tout à fait médiocre. Il n'en est pas de même des corps liquides, qui, par différents procédés, peuvent être amenés à un état d'identité absolue.

201. Formules relatives aux gaz. — Le volume d'un gaz dépend à la fois de la température à laquelle il se trouve et de la pression qu'il supporte ; de là une complication un peu plus grande dans les formules qui se rapportent à cette classe de corps. Cherchons la relation qui existe entre les volumes V et V′ d'une même masse de gaz aux températures t et t' et sous les pressions P et P′. Appelons U le volume de la même masse de gaz à la pression P et à la température t' ; soit en outre α le coefficient de dilatation du gaz.

Les deux volumes V et U, étant à la même pression, doivent être proportionnels aux binomes de dilatation (198), ce qui donne la relation

$$\frac{V}{U}=\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}.$$

Les volumes U et V′, à la même température t', sont, d'après la loi de Mariotte, inversement proportionnels aux pressions ; on a donc

$$\frac{U}{V'}=\frac{P'}{P}.$$

Multipliant membre à membre les deux équations précédentes, on obtient

$$\frac{V}{V'}=\frac{P'}{P}\cdot\frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}, \qquad (9)$$

c'est-à-dire que *les volumes d'une même masse de gaz sont inversement proportionnels aux pressions et directement proportionnels aux binomes de dilatation.*

On peut de l'équation (9) en déduire facilement une autre en remarquant que les densités d'une même masse de gaz sont évidemment en raison inverse des volumes qu'elle occupe. On a donc

$$\frac{D}{D'}=\frac{P}{P'}\cdot\frac{1+\alpha t'}{1+\alpha t}. \qquad (10)$$

Ce qui veut dire que *les densités d'un gaz sont directement proportionnelles aux pressions et inversement proportionnelles aux binomes de dilatation.*

CHAPITRE XXI.

DILATATION DES SOLIDES.

202. Expériences de Laplace et Lavoisier.— Laplace et Lavoisier ont déterminé la dilatation linéaire d'un grand nombre de solides par le procédé suivant :

La barre à étudier AB (fig. 203) est appuyée par l'une de ses extrémités contre un obstacle fixe A, l'autre extrémité B peut se mouvoir librement en poussant le levier OB, qui est mobile au point O et porte une lunette dont la ligne de visée est dirigée sur une mire éloignée. Il est évident qu'un déplacement BB' correspondra sur la mire à une longueur CC' notablement plus considérable, et d'autant plus que la mire sera plus éloignée. Le rapport de CC' à BB' est égal au rapport de OB à OC et le même d'ailleurs dans toute la durée des expériences. Il suffira, pour le déterminer une fois pour toutes, de produire un déplacement BB' *déterminé,* et de mesurer la quantité correspondante CC'.

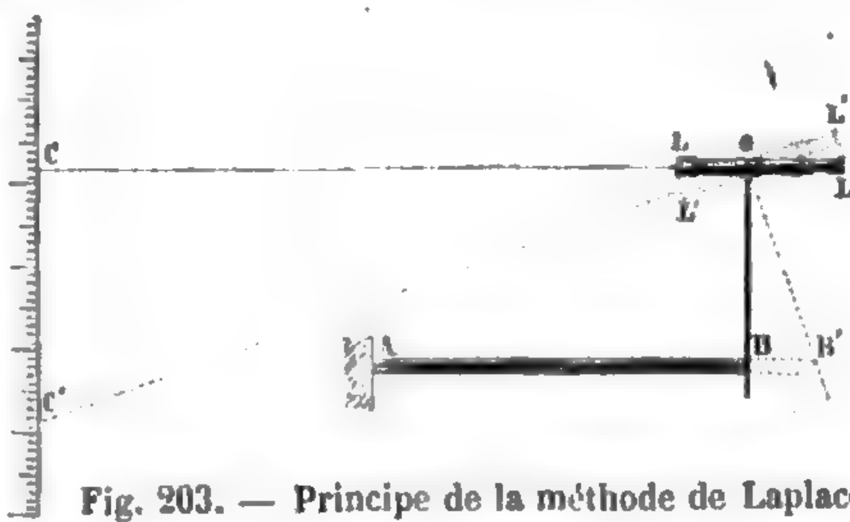


Fig. 203. — Principe de la méthode de Laplace et Lavoisier.

La figure 204 représente l'appareil dont se sont servis Laplace et Lavoisier. Entre quatre massifs en pierres de taille N est placée une cuve C dans laquelle on place la barre S sur laquelle on expérimente. Celle-ci s'appuie par une de ses extrémités sur un montant fixe B', lié invariablement à deux des massifs; à son autre extrémité elle pousse le montant B, qui détermine la rotation de l'axe *aa'*; celui-ci entraîne dans son mouvement la lunette LL' qui est dirigée

sur la mire. On commence par entourer la barre de glace fondante, et on observe le numéro de la mire sur lequel tombe la ligne de

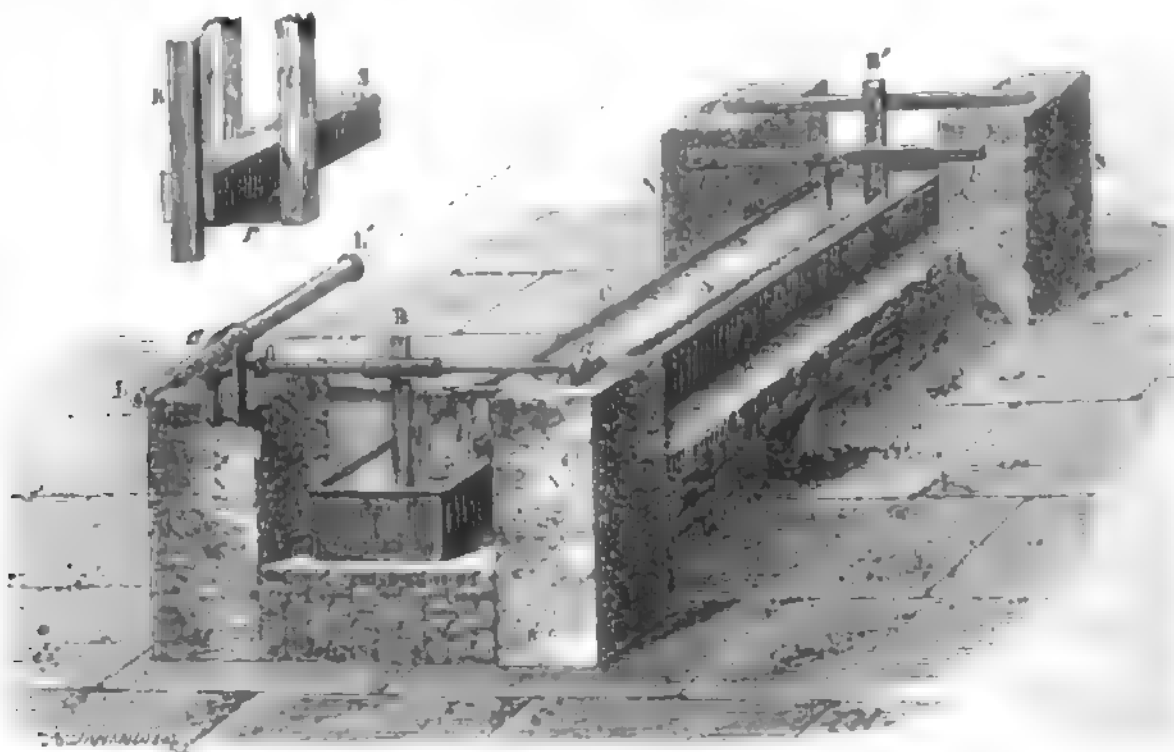


Fig. 204. — Appareil de Laplace et Lavoisier.

visée de la lunette. On élève ensuite la température de l'auge, et on mesure l'allongement correspondant.

Laplace et Lavoisier ont reconnu ainsi que la dilatation des solides est sensiblement uniforme, entre 0 et 100° du moins; au delà elle varie avec la température.

Le tableau suivant renferme les résultats les plus importants obtenus par eux.

COEFFICIENTS DE DILATATION LINÉAIRE.

Or au titre de Paris recuit	0,000015153	Fer doux forgé	0,000012204
Or au titre de Paris non recuit	0,000015515	Fer rond passé à la filière.	0,000012350
Acier non trempé . . .	0,000010792	Flint-glass anglais. . .	0,000008116
Acier trempé recuit à 65°	0,000012395	Or de départ	0,000014660
Argent de coupelle. . .	0,000019075	Platine.	0,000009918
Argent au titre de Paris.	0,000019086	Plomb	0,000088483
Cuivre rouge	0,000017173	Verre de France avec plomb	0,000008715
Cuivre jaune	0,000018782	Zinc laminé.	0,000029416
Étain de Malaca. . . .	0,000019376	Zinc forgé	0,300031083
Étain de Falmouth. . .	0,000021729		

203. Pendule compensateur. — Le pendule est, comme l'on sait, le régulateur des horloges. Supposons que l'instrument soit

bien réglé à la température de zéro et que celle-ci s'élève; la longueur du pendule augmentant, la durée de l'oscillation augmente aussi, et par suite l'horloge devra *retarder*. Le phénomène inverse aurait lieu si la température s'abaissait. On voit donc que les horloges doivent réellement avancer en hiver et retarder en été, et par suite il convient de toucher de temps à autre à la lentille du balancier pour assurer la régularité de leur marche.

On parvient à atténuer notablement les effets de la température à l'aide des pendules compensateurs, dont la disposition peut d'ailleurs varier beaucoup.

1° *Pendule à gril de Leroy.* — Ce pendule est formé de quatre châssis alternativement en acier F et en laiton C (fig. 205) : les châssis en laiton s'appuient sur la base inférieure des châssis en acier, et la tige d'acier qui porte la lentille est fixée à la partie supérieure du second châssis en laiton. Il suit de là que par l'effet de l'allongement des tiges d'acier la lentille s'abaissera, tandis que l'effet de l'allongement du laiton sera de la relever. On conçoit que ces deux effets puissent se neutraliser complétement; il suffit pour cela que la dilatation du fer soit égale à celle du cuivre. Soit L la somme des longueurs du fer, L' la somme des longueurs du cuivre; il faudra, pour que cette neutralisation ait lieu, que $LKt = L'K't$ ou que $LK = L'K'$; K et K' étant les coefficients de dilatation linéaire du fer et du cuivre.

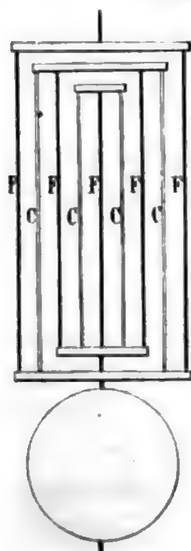
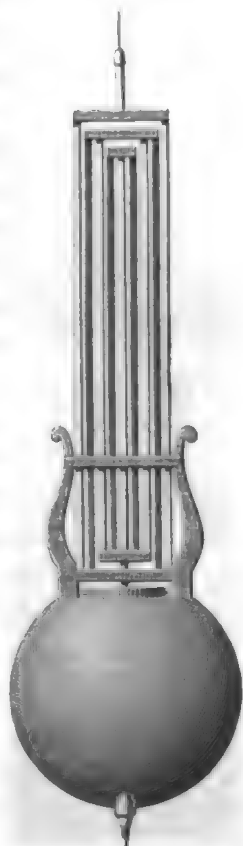
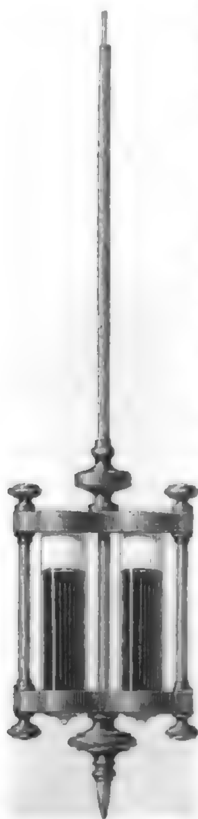


Fig. 205.
Pendule à gril.


Fig. 206. — Pendule à gril.

En consultant le tableau de la page précédente, on voit que K est à peu près les $\frac{2}{3}$ de K'; il faut

donc que la longueur du cuivre soit à peu près les $\frac{2}{3}$ de celle du fer. Cette condition conduit à disposer au moins *deux* châssis en laiton; avec un seul la compensation ne saurait avoir lieu, puisque la longueur du fer serait à peu près double de celle du cuivre. Si l'on ne voulait qu'un châssis de chacun des métaux, il faudrait que ceux-ci eussent une différence de dilatation beaucoup plus prononcée que celle qui a lieu entre le fer et le cuivre; on pourrait prendre, par exemple, le fer et le zinc (pendule Jurgensen).


Fig. 207. — Pendule de Graham.

On remarquera que, pour que la compensation fût parfaite, il faudrait que le centre d'oscillation (45) demeurât à la même distance du centre de suspension, ce qui ne résulte pas nécessairement de la disposition précédente, qui ne peut être considérée que comme un moyen d'atténuer les irrégularités de marche provenant de la température, mais non de les faire disparaître tout à fait. La vis que l'on voit sur la figure 206 au-dessus de la lentille, permet de faire mouvoir un peu cette dernière, de façon à compléter, si c'est nécessaire, l'effet de la compensation.

2° *Pendule de Graham.* — Il se compose d'une tige en fer, portant à sa partie inférieure une plaque sur laquelle reposent deux cylindres de verre contenant du mercure. Lorsque la température augmente, l'allongement de la tige de fer abaisse le centre de gravité, et par suite le centre d'oscillation de l'appareil; mais la dilatation du mercure produit un phénomène inverse, et on conçoit qu'on puisse régler la hauteur du mercure de telle façon qu'il s'établisse une compensation à peu près exacte [1].

1. Le mercure étant beaucoup plus dense que le fer, on peut admettre approximativement que le centre de gravité du pendule est à la hauteur du milieu de la colonne mercurielle. Dans cette hypothèse on peut facilement calculer la hauteur du mercure qu'il convient de mettre à zéro, pour qu'à toute température ce point demeure à la même distance de l'axe de suspension. (Voir les problèmes.)

3° *Pendule Brocot.* — Ce pendule, fort en usage depuis quelques années, est formé d'une tige de fer *f* supportant inférieurement la lentille. De la partie supérieure partent deux tiges de laiton *cc* qui, par l'intermédiaire des leviers *aa* et des pivots *tt*, fixés à la lentille, relèvent cette dernière quand la température augmente. On conçoit que les bras de levier peuvent être choisis de telle façon que, par l'effet inverse des dilatations du cuivre et du fer, le centre de la lentille demeure à la même distance de l'axe de suspension.

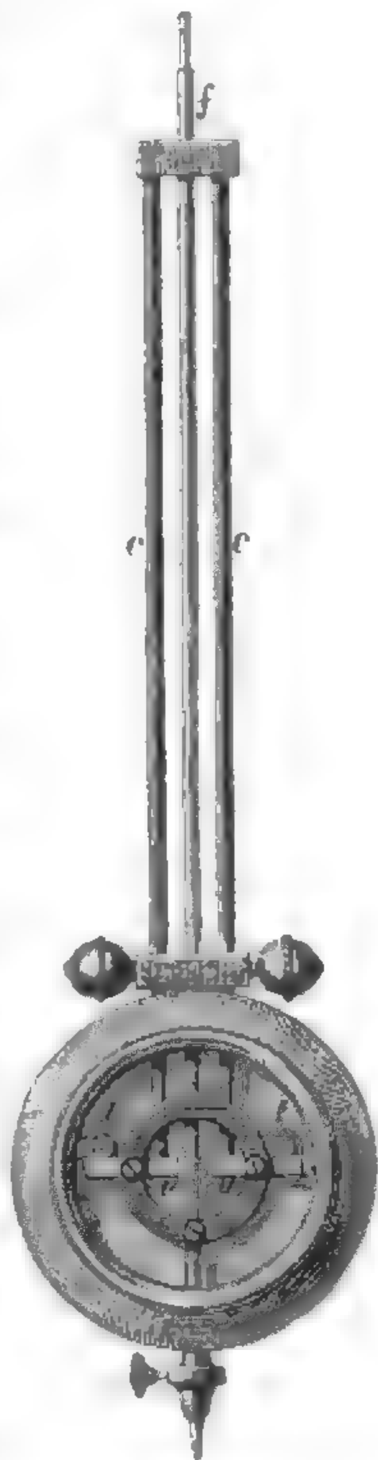


Fig. 208.
Pendule Brocot.

204. Puissance de dilatation des solides. — La force avec laquelle se produit la dilatation des solides est extrêmement considérable; il suffit, pour s'en convaincre, de calculer l'effort mécanique qu'il faudrait exercer pour produire un effet équivalent. Ainsi, par exemple, le fer s'allonge pour un accroissement de température de 0 à 100°, de 0,0012 de la longueur initiale ; pour produire cet allongement sur un cube de 1 décimètre de côté, il faudrait lui appliquer une traction d'environ 250,000 kilogr. On voit donc qu'il serait tout à fait inutile de chercher à combattre mécaniquement les effets d'une force aussi intense; la seule chose qu'il convienne de faire dans les constructions, et en général dans les ajustements où entrent des métaux, c'est de disposer les pièces de façon que la dilatation puisse s'effectuer sans entrave. Ainsi, dans un chemin de fer, les rails ne se touchent pas exactement, il existe entre leurs extrémités un petit intervalle qui permet aux variations de longueur de se produire. Les poutres en fer destinées aux constructions peuvent se mouvoir à leur bout sans rencontrer d'obstacle qu'elles renverseraient inévitablement. Les feuilles de zinc ou de plomb employées dans les toitures sont placées de façon à pouvoir chevaucher, dans une certaine mesure, les unes sur les autres.

Il convient de remarquer, au surplus, que la dilatation des métaux, très-petite quand on rapporte sa valeur à l'unité, peut devenir très-considérable si la longueur qui se dilate est considérable elle-même. Supposons qu'il s'agisse, par exemple, de la ligne de fer qui s'étend de Paris à Marseille, et qui a une longueur de près de 800 kilomètres. Les variations extrêmes de température de l'été à l'hiver pouvant aisément atteindre 50°, il s'ensuit une variation possible de longueur de $800000^{m} \times 0{,}0006 = 480^{m}$. Cette variation est très-grande en réalité, et si les rails formaient une ligne continue à une certaine température, cette ligne serait descellée ou brisée lorsqu'il viendrait à se produire un changement dans un sens ou dans un autre.

205. Conversion de la chaleur en travail mécanique. — Remarquons encore que la chaleur appliquée à une barre métallique produit deux effets bien distincts, l'un qui se manifeste par une élévation de température, l'autre par un travail mécanique très-considérable. Il est naturel de supposer que si le corps solide était placé dans des conditions telles que sa dilatation ne pût pas avoir lieu, la même quantité de chaleur produirait un effet thermométrique plus marqué. Une remarque tout à fait analogue s'applique à la dilatation des liquides et des gaz, et même dans ce dernier cas il est très-aisé d'en faire la vérification expérimentale. On voit donc ici un premier exemple d'un fait qui se reproduit très-fréquemment dans les phénomènes physiques, je veux dire la conversion de la chaleur en travail mécanique ou réciproquement. Quand une portion quelconque de chaleur semble disparaître, c'est qu'il y a un travail mécanique produit. Si, au contraire, on effectue un certain travail, celui-ci se manifeste sous la forme de chaleur ; c'est ce qui arriverait si on comprimait un corps jusqu'à le ramener au volume qu'il occupe à une température moindre ; on observerait nécessairement une élévation de température.

CHAPITRE XXII.

DILATATION DES LIQUIDES.

206. Relation entre la dilatation apparente et la dilatation absolue. — Lorsqu'un liquide est renfermé dans un vase et qu'on vient à augmenter la température, le niveau du liquide s'élève en vertu de l'excès de sa dilatation sur celle de l'enveloppe. L'accroissement de volume observé, en supposant que le vase n'éprouve aucune dilatation, constitue la dilatation apparente; elle est évidemment plus petite que la dilatation réelle, car si le vase eût conservé le même volume, le niveau se serait élevé plus haut.

Il existe entre le coefficient de dilatation apparente, le coefficient de dilatation réelle et celui de l'enveloppe une relation très-simple.

Considérons un liquide contenu dans un vase de forme thermométrique, supposons que le tube soit divisé en parties d'égale capacité et que l'on connaisse par un jaugeage préliminaire le nombre de divisions auquel équivaut le volume du réservoir. A la température de zéro le liquide occupe le réservoir et une partie du tube, ce qui fait un nombre total de divisions V. Si l'on élève la température de 1°, le volume devient $V(1 + D)$, D étant le coefficient de dilatation réelle. D'ailleurs à cette nouvelle température le nombre de divisions est V'. Mais ces divisions n'ont plus la même capacité, chacune d'elles est devenue $1 + K$, K étant le coefficient de dilatation de l'enveloppe, de sorte que le volume effectif des V' divisions est $V'(1 + K)$; on a donc l'égalité $V(1 + D) = V'(1 + K)$, d'où

$D = \frac{V'-V}{V} + \frac{V'}{V}K$. -Or $\frac{V'-V}{V}$ est précisément le coefficient de dilatation apparente Δ, par suite $\frac{V'}{V} = 1 + \Delta$.

Ces valeurs substituées dans l'expression de D donnent la relation

$$D = \Delta + K + \Delta K.$$

Δ et K sont deux quantités très-petites, on peut donc, en restant dans un certain ordre d'approximation, négliger leur produit devant l'une quelconque d'entre elles, de sorte que l'équation précédente se réduit à

$$D = \Delta + K,$$

c'est-à-dire que le coefficient de dilatation réelle est égal au coefficient de dilatation apparente augmenté de celui de l'enveloppe.

207. Dilatation du verre. — A l'aide de cette relation on peut trouver le coefficient de dilatation d'un verre quelconque; il suffit de mesurer le coefficient de dilatation apparente du mercure dans un thermomètre fait avec ce verre et de le retrancher du coefficient de dilatation réelle du métal, qui est égal, comme nous le verrons plus loin, à $\frac{1}{5550}$. Le coefficient de dilatation apparente est un peu variable d'un verre à l'autre; si l'on admet que le nombre $\frac{1}{6480}$ trouvé par Dulong et Petit représente sa valeur moyenne, on aura pour coefficient de dilatation du verre

$$K = \frac{1}{5550} - \frac{1}{6480} = \frac{1}{38700}.$$

208. Dilatation d'un liquide quelconque. — La dilatation du verre employé à la construction d'un thermomètre préparé comme il a été dit précédemment étant connue, on pourra se servir de l'instrument pour mesurer la dilatation d'un liquide quelconque. A cet effet, on introduit dans son intérieur le liquide que l'on veut étudier et on observe exactement le volume V, c'est-à-dire le nombre total de divisions qu'il occupe à zéro. On porte ensuite la température à t et on mesure le nouveau volume V'. Ces V' divisions représentent en réalité un volume $V'(1 + Kt)$ par suite de la dilatation du verre;

d'ailleurs le volume réel du liquide est V (1 + D), D désignant l'accroissement de volume de l'unité, de zéro à la température considérée ; on a donc l'équation

$$V(1+D) = V'(1+Kt)$$

de laquelle on peut tirer la valeur de D.

M. Pierre a fait par cette méthode un travail fort étendu, dans lequel il a successivement examiné un très-grand nombre de liquides.

La figure 209 représente l'appareil dont il s'est servi. Le thermomètre qui contient le liquide à étudier est placé à côté d'un thermomètre à mercure qui donne la température. Le réservoir et une petite portion de la tige seulement sont plongés dans le bain que renferme le cylindre inférieur. Quant aux parties supérieures des tiges, elles sont contenues dans un second cylindre plus petit où l'on entretient de l'eau à une température sensiblement constante et indiquée d'ailleurs par un thermomètre très-sensible.

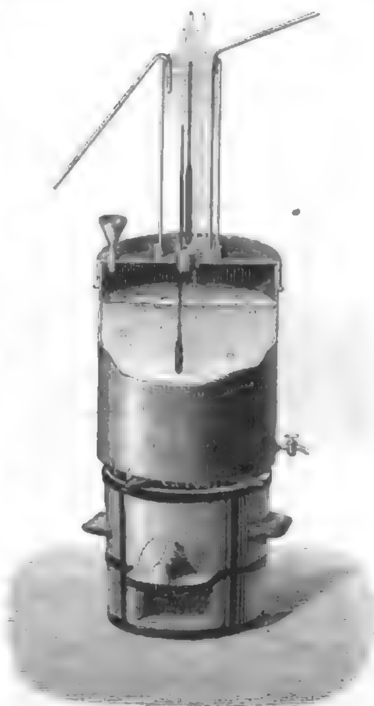


Fig. 209. — Appareil de M. Pierre.

Il résulte de ces expériences que la dilatation des liquides est en général très-supérieure à celle des solides. D'ailleurs elle ne se fait pas uniformément par rapport au thermomètre à mercure, et elle s'accroît très-sensiblement à mesure que la température augmente. C'est ce que montre le tableau suivant :

	Volume à 0.	Volume à 10°.	Volume à 40°.
Eau	1	1,000146	1,007492
Alcool	1	1,010661	1,044828
Éther	1	1,015408	1,066863
Sulfure de carbone	1	1,011554	1,049006
Esprit de bois	1	1,012020	1,050509

209. Maximum de densité de l'eau. — Si on applique la méthode expérimentale qui vient d'être décrite à l'eau, on pourra aisément calculer de degré en degré le volume qu'occupe un poids constant de ce liquide ; c'est ainsi qu'on a reconnu que ce volume est le plus petit possible à la température de 4°. A cette température l'eau possède donc une densité maxima, de sorte qu'à partir de 4°, soit que l'eau s'échauffe, soit qu'elle se refroidisse, son volume augmente. C'est là une exception curieuse et unique à la loi générale de la dilatation par la chaleur.

On rend sensible cette anomalie à l'aide de l'appareil suivant. Il se compose (fig. 210) de deux thermomètres, l'un à alcool, l'autre à eau. Celui-ci, à raison de la moindre dilatabilité du liquide, a un gros réservoir en spirale, entourant celui du thermomètre à alcool. Les réservoirs sont contenus tous les deux d'ailleurs dans une boîte en métal que l'on peut remplir de glace fondante. Les deux instruments ont été réglés de telle façon qu'à la température zéro les extrémités des deux colonnes liquides soient sur une même ligne horizontale. Si, lorsqu'il en est ainsi, on enlève la glace et qu'on abandonne l'appareil à son réchauffement naturel, ou si, pour activer le phénomène, on place au-dessous une lampe à alcool, on voit immédiatement l'alcool monter, tandis que l'eau descend et cette marche inverse se maintient jusqu'à ce que la température soit devenue égale à 4° environ. A ce moment le mouvement descendant de l'eau s'arrête, et l'extrémité de la colonne commence à se mouvoir dans le même sens que celle de l'alcool. Cette expérience, très-propre à montrer le phénomène, ne permet pas de mesurer exactement la température du maximum de densité, parce qu'on observe en réalité la dilatation apparente de l'eau et non point sa dilatation absolue. L'expérience suivante, due à Hobes, est plus rigoureuse.

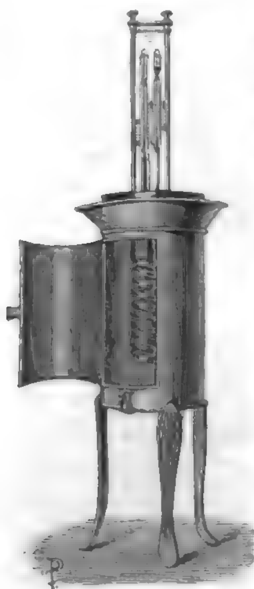


Fig. 210. — Maximum de densité de l'eau.

On se sert d'une éprouvette percée à la partie supérieure et à la partie inférieure d'ouvertures qui laissent passer deux thermomètres. On remplit l'éprouvette d'eau et on place un mélange réfrigérant dans le manchon qui entoure sa partie moyenne. Cela posé, voici ce qu'on observe :

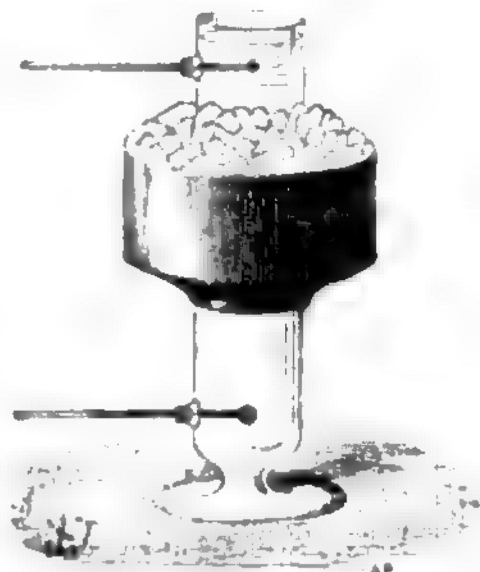


Fig. 211. — Expérience de Hobes.

Le thermomètre inférieur descend progressivement jusqu'à 4°, et reste ensuite stationnaire. Pendant la première partie du phénomène le thermomètre supérieur ne varie pas sensiblement; mais lorsque le premier a atteint la température stationnaire, il commence à descendre, atteint la température de zéro et finalement l'eau supérieure se congèle, si le mélange frigorifique conserve assez longtemps son efficacité. Ces faits s'expliquent très-simplement :

L'eau contenue dans la partie moyenne se refroidit, sa densité devient plus grande et elle tombe au fond. Il s'établit ainsi un courant qui refroidit l'eau inférieure. Mais quand celle-ci est arrivée à 4°, le courant cesse, parce que, la température devenant plus basse, la densité est moindre. Alors l'eau qui est dans la partie moyenne se refroidit jusqu'à zéro, de petites aiguilles de glace se forment, s'élèvent en vertu de leur légèreté spécifique, et amènent ainsi un courant qui détermine la congélation de l'eau supérieure, tandis que celle qui est à la partie inférieure sa maintient à 4°.

Cette expérience est, sur une petite échelle, l'image de ce qui se passe en hiver dans les lacs d'eau douce. Le refroidissement de la couche superficielle ne se propage pas jusqu'au fond de la masse liquide; celle-ci, quel que soit le froid extérieur, conserve une température invariable de 4°. C'est là un fait fort intéressant et un exemple des étroites relations qui unissent les phénomènes naturels et les font concourir à un but déterminé. Ainsi, à cette anomalie que présente l'eau dans sa dilatation est liée, comme conséquence, la persistance d'une température modérée au fond des masses d'eau, même pendant les froids rigoureux. Cette circonstance d'une part, et de l'autre la légèreté spécifique de la glace et

le défaut de conductibilité de l'eau, ont pour effet de soustraire la multitude immense d'animaux qui peuplent ce liquide, à des températures rigoureuses qui amèneraient leur destruction.

210. Dissolutions salines. — Dans l'eau tenant en dissolution une quantité de sel plus ou moins considérable le maximum de densité s'abaisse en même temps que le point de congélation; mais le premier effet est plus marqué que le second, de sorte que pour une certaine proportion de matière saline le maximum de densité est au-dessous du terme de la congélation. Il n'est donc pas directement observable, et pour en constater la réalité on est obligé de placer la dissolution dans des circonstances telles, qu'elle reste liquide au-dessous de son point de congélation. C'est là un exemple curieux de la continuité des lois physiques et de la restriction qu'il convient d'apporter en physique au principe, si juste et si logique d'ailleurs, des causes finales. Ainsi, l'eau de mer a un maximum de densité, mais avant qu'elle ait atteint la température qui lui correspond, la congélation s'est produite. Ce maximum de densité ne joue donc aucun rôle dans la nature, son existence n'est liée à aucune utilité pratique, elle est donc simplement la preuve de la permanence de la loi physique, alors même que s'évanouissent les circonstances qui rendent sensible son utilité générale.

211. Loi de la dilatation des liquides. — Ainsi que nous l'avons indiqué plus haut (208), la dilatation des liquides ne se fait pas proportionnellement à la température; d'où il suit que, si l'on calcule le coefficient moyen de dilatation, on trouvera une valeur variable avec la température.

De l'ensemble des recherches qui ont été faites sur ce sujet, il résulte que pour un grand nombre de liquides ce coefficient varie proportionnellement à la température. Si donc on désigne par Δ la dilatation de 0 à t, on pourra écrire

$$\frac{\Delta}{t} = a + bt, \quad \text{d'où } \Delta = at + bt^2,$$

a et b étant deux constantes spécifiques qui définissent la dilatabilité du liquide dont il s'agit.

Pour quelques liquides plus dilatables deux constantes ne suffi-

sent pas, et la dilatation doit être représentée par une formule à trois termes de la forme suivante :

$$\Delta = at + bt^2 + ct^3.$$

Voici quelques formules de ce genre extraites du travail de M. Pierre :

Alcool........... $\Delta = 0{,}0010486\, t + 0{,}0000017510\, t^2 + 0{,}00000000134518\, t^3$
Éther............ $\Delta = 0{,}0015132\, t + 0{,}0000023592\, t^2 + 0{,}000000040051\, t^3$
Sulfure de carbone $\Delta = 0{,}0011398\, t + 0{,}0000013707\, t^2 + 0{,}00000019123\, t^3$
Brome........... $\Delta = 0{,}0010382\, t + 0{,}0000017114\, t^2 + 0{,}0000000054471\, t^3$

L'examen des formules propres aux différents liquides montre que dans aucun d'eux il n'existe de maximum de densité ; cette particularité demeure exclusive à l'eau.

212. Dilatation absolue du mercure. — Le rôle exceptionnel que joue le mercure dans les expériences de physique, son emploi particulièrement dans la construction du baromètre et du thermomètre, exigeaient la détermination rigoureuse de la dilatation de ce liquide. Dulong et Petit ont résolu cette question d'une façon très-exacte, et à l'aide d'une méthode ingénieuse dont le principe consiste à substituer à la mesure, toujours un peu incertaine, des volumes, l'observation plus sûre des hauteurs d'une colonne liquide.

Soient A et B deux tubes communiquant entre eux par un tube très-étroit CD et renfermant du mercure. Si ce liquide est partout à la même température, il devra s'élever à la même hauteur dans les deux branches en vertu du principe fondamental des vases communicants. Mais si le tube AC, par exemple, étant maintenu à zéro, on élève la température de BD, la densité du liquide chaud devenant plus faible, la hauteur nécessaire pour faire équilibre à la pression exercée par le liquide froid sera plus considérable. Concevons dans le tube horizontal de communication une tranche verticale, et désignons par h et h' les hauteurs du liquide dans la branche froide et dans

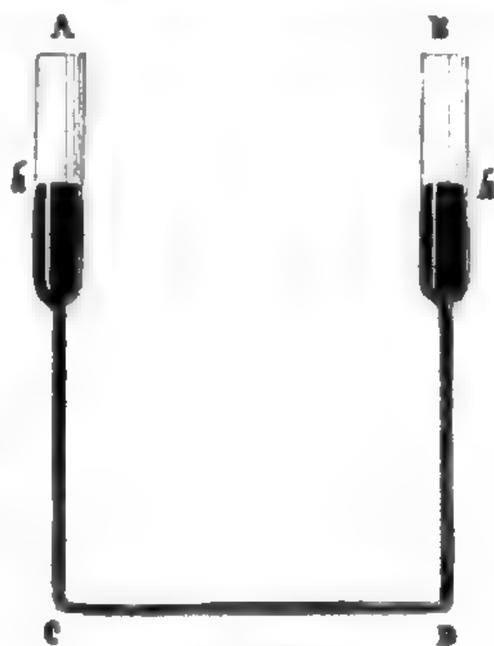


Fig. 212.
Principe de la mesure de la dilatation du mercure.

la branche chaude au-dessus du centre de gravité de cette tranche; les pressions devant être les mêmes des deux côtés, on aura nécessairement, en appelant d et d' les densités du mercure à zéro et à la température t, la relation $hd = h'd'$.

Mais, d'après ce qui a été expliqué plus haut (199), $d' = \frac{d}{1+m}$, m étant la dilatation du liquide de 0 à t; par conséquent $hd = \frac{h'd}{1+m}$, d'où

$$m = \frac{h' - h}{h}.$$

On voit donc qu'il suffira de mesurer exactement les hauteurs h' et h pour qu'on puisse en déduire m.

Il est à remarquer qu'il n'y a que le centre de gravité de la tranche liquide, que nous avons considérée, qui soit en équilibre; la partie supérieure est plus pressée du côté du liquide chaud et la partie inférieure du côté du liquide froid; il tend donc à se produire un double courant, auquel met obstacle la capillarité du tube de communication. D'ailleurs, à supposer qu'il se produisît, ses effets inverses se compenseraient sensiblement relativement au niveau du liquide dans les deux branches.

Voici maintenant comment Dulong et Petit ont réalisé la méthode précédente.

Le tube de communication, entre les deux branches A et B de l'appareil (fig. 213), repose sur une barre de fer en forme de T, dont on amène la surface à une horizontalité parfaite. A cet effet on fait reposer la barre sur un socle muni de vis calantes, et deux niveaux à bulles sont disposés rectangulairement sur la barre elle-même. L'une des colonnes B est maintenue dans un manchon contenant de la glace fondante; la deuxième A est placée dans un cylindre en cuivre contenant de l'huile et chauffé par un fourneau attenant à l'appareil. Lorsque l'on veut faire une observation, on s'arrange pour qu'au moment où se trouve atteinte la température à laquelle on veut expérimenter, l'huile s'élève tant soit peu dans le tube A au-dessus du couvercle du cylindre, de façon à pouvoir être visée par la lunette du cathétomètre; il suffit pour atteindre ce but d'ajouter ou d'enlever une petite quantité d'huile. On vise ensuite l'extrémité de la colonne B, ce qui donne la différence des hau-

teurs h' et h. Il reste à connaître la hauteur absolue h. Dans ce but on a relevé directement la hauteur d'un repère i au-dessus de la surface de la barre, et on retranche de cette hauteur la demi-épaisseur

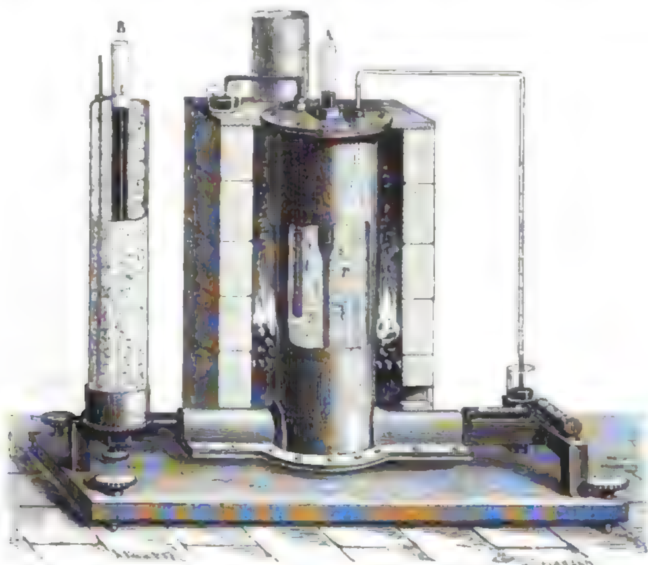


Fig. 213. — Appareil de Dulong et Petit pour la dilatation absolue du mercure.

du tube horizontal. Il suffit dès lors de mesurer au moment de l'expérience la distance de l'extrémité de la colonne B au point de repère.

La température de l'huile est donnée par le thermomètre à poids t et par un thermomètre à air r, dont le principe sera indiqué plus loin.

Par l'emploi de cette méthode, Dulong et Petit ont constaté que la dilatation du mercure est sensiblement uniforme entre 0 et 100°. Au-dessus, ainsi que cela a lieu pour les autres liquides, elle va en augmentant, mais d'une manière peu marquée. Ainsi le coefficient moyen entre 0 et 100° est $\frac{1}{5550}$. Entre 0 et 200° sa valeur devient $\frac{1}{5425}$, et $\frac{1}{5300}$ entre 0 et 300°.

M. Regnault, en conservant le principe de l'expérimentation de Dulong et Petit, a employé un appareil amélioré à plusieurs égards et dans lequel les branches A et B étaient beaucoup plus longues, ce qui lui donnait une plus grande sensibilité. Les résultats qu'il a obte-

nus ne diffèrent pas notablement de ceux de Dulong et Petit; ainsi le coefficient moyen entre 0 et 100° a été trouvé égal à $\frac{1}{5509}$.

Il résulte des mêmes expériences que le coefficient moyen entre 0 et 50° est égal à $\frac{1}{5547}$, nombre presque absolument égal à $\frac{5550}{1}$.

213. Dilatation du fer et du platine. — Le coefficient de dilatation réelle du mercure étant connu, on en déduit, comme nous l'avons indiqué plus haut (207), le coefficient de dilatation du verre. Dulong et Petit en ont déduit aussi la dilatation du fer et du platine (métaux non attaquables par le mercure) par la méthode suivante :

Ils donnaient au métal sur lequel ils voulaient expérimenter la forme d'un cylindre qu'ils introduisaient dans le réservoir d'un thermomètre à poids. Soit P le poids du métal introduit et D sa densité à 0. On opère comme avec le thermomètre à poids, c'est-à-dire qu'après avoir rempli l'appareil de mercure à la température de la glace fondante, on observe le poids p du métal qui sort à une température donnée t.



Fig. 214. — Dilatation du fer et du platine.

Le volume à zéro du mercure sorti est $\frac{p}{d}$, d désignant la densité du mercure à 0, et par conséquent son volume à t degrés est $\frac{p}{d}(1+mt)$, m étant le coefficient de dilatation du mercure. Or ce volume représente évidemment la dilatation du métal, plus la dilatation du mercure, moins la dilatation du verre.

Si donc on désigne par M le poids du mercure qui remplit l'appareil à 0, par K le coefficient de dilatation du verre et par x la dilatation de l'unité de volume du métal soumis à l'expérience, on aura l'équation

$$\frac{p}{d}(1+mt)=\frac{P}{D}x+\frac{M}{d}mt-\left(\frac{P}{D}+\frac{M}{d}\right)Kt,$$

d'où on déduira la valeur de x.

214. Convection de la chaleur dans les liquides. — Lorsque les diverses parties d'un liquide sont inégalement chaudes, il s'établit entre elles une différence de densité correspondante, et il se produit, en conséquence, des courants qui ont pour résultat de répartir la température dans les différents points de la masse, malgré sa mauvaise conductibilité. On donne à ce phénomène le nom de *convection*.

Ainsi, par exemple, si on vient à chauffer un vase par la partie inférieure, les parties qui subissent directement l'action du foyer se dilatent et s'élèvent à la partie supérieure; elles sont remplacées par des couches froides qui viennent s'échauffer pour s'élever à leur tour, et ainsi indéfiniment. On peut rendre ce double courant très-visible en répandant dans l'eau de la sciure de bois de chêne, qui a à peu près la même densité qu'elle. On reconnaît ainsi que le courant ascendant occupe le centre du vase, tandis que le courant descendant s'établit le long des parois.

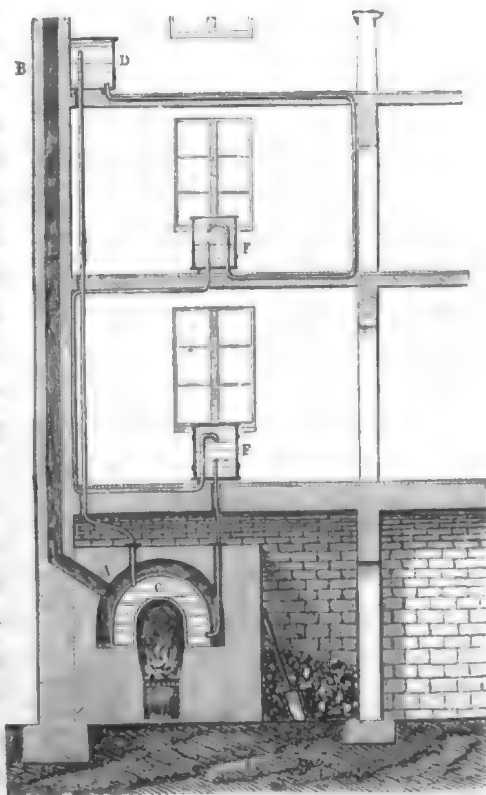


Fig. 215. — Chauffage à l'eau chaude.

215. Chauffage par circulation d'eau chaude. — Le chauffage à l'eau chaude est une simple application de l'expérience précédente. La figure 215 représente une des dispositions d'appareil les plus usitées; c'est le système dit à basse pression, parce que la température ne dépasse jamais 100°. La chaudière C, chauffée par un foyer dont les produits s'échappent dans la cheminée AB,

communique avec la partie supérieure de l'édifice par un tube qui vient se rendre dans le réservoir D. Le liquide se rend de ce réservoir à un second réservoir E placé à l'étage inférieur de celui-ci, à un troisième F, et ainsi de suite. Finalement le dernier communique avec la partie inférieure de la chaudière. L'ensemble de la chaudière, des tubes, des réservoirs, est complétement rempli d'eau, à l'exception d'un petit espace ménagé à la partie supérieure, afin de laisser une libre action à la dilatation du liquide. Le courant ascendant s'établit dans le tube de gauche, et, pour une température déterminée du générateur, la circulation d'eau chaude prend un caractère remarquable de régularité.

216. Courants marins. — La convection de la chaleur joue un rôle, sinon de premier ordre, du moins fort important, dans la production des courants marins. La mer est, en effet, une masse immense de liquide dont les différents points sont à des températures différentes. Il s'ensuit que l'équilibre est impossible et que les diverses parties doivent être dans un mouvement continuel les unes par rapport aux autres. Les eaux des mers polaires et les eaux des mers équatoriales étant en pleine communication les unes avec les autres, le niveau de ces dernières doit être constamment plus élevé à cause de l'excès de leur température. Il résulte de cette circonstance une sorte de déversement continuel de liquide à l'équateur, et par suite un immense courant d'eau chaude allant vers les pôles. Mais évidemment à ce courant correspond un courant inférieur d'eau froide qui vient se réchauffer à l'équateur pour se déverser ensuite à la partie supérieure, et ainsi de suite. C'est là un des traits fondamentaux du célèbre courant connu sous le nom de *Gulf-stream*. Ce courant d'eau chaude forme comme une immense rivière au milieu de la mer, différant du milieu dans lequel elle coule et par la température de ses eaux, et par leur salure, et par leur couleur. Il a pour origine le golfe du Mexique, d'où il sort par le détroit de Bahama, marche vers le nord-est et se divise en deux branches, dont l'une vient adoucir la température des côtes de l'Irlande et de la Norwége. Quant à l'autre, elle s'infléchit graduellement, finit par redescendre l'Atlantique du nord au sud et vient se perdre dans la région équatoriale.

« Le *Gulf-stream* est une rivière au milieu de l'Océan, dont le niveau ne change ni dans les plus fortes sécheresses ni dans les plus fortes pluies. Il est limité par des eaux froides, tandis que son courant est chaud. Il prend sa source dans le golfe du Mexique et se jette dans l'océan Arctique. Il n'existe pas sur la terre de cours d'eau plus majestueux ; sa vitesse est plus grande que celle du Mississipi ou des Amazones, et son débit mille fois plus considérable. Ses eaux, depuis le golfe jusqu'aux côtes de la Caroline, sont d'une couleur d'indigo foncé, et la ligne de séparation avec les eaux de l'Océan est parfaitement appréciable aux yeux. Souvent on peut voir un navire dont une moitié se trouve immergée dans les eaux du *Gulf-stream*, tandis que l'autre flotte dans les eaux de l'Océan, tant la ligne de séparation est nette et distincte. » (Maury, *Géographie physique de la mer*.)

La convection de la chaleur dans les eaux de l'Océan intervient sans doute dans la formation des courants, mais non pas d'une façon prédominante ; c'est surtout à l'action des vents, qui sont d'ailleurs eux-mêmes le produit de la convection de la chaleur dans l'atmosphère, que sont subordonnés ces phénomènes si complexes ; nous reviendrons plus loin sur ce sujet.

CHAPITRE XXIII.

DILATATION DES GAZ.

217. Expériences de Gay-Lussac. — Gay-Lussac a fait sur la dilatation des gaz des recherches dont les conclusions sont restées longtemps classiques. Il se servait d'un thermomètre à gros réservoir A, renfermant le gaz soumis à l'expérience; un index de mercure *mn* le séparait de l'air extérieur en lui laissant toute liberté pour se dilater. Le gaz avait d'ailleurs été desséché en passant à travers un tube C

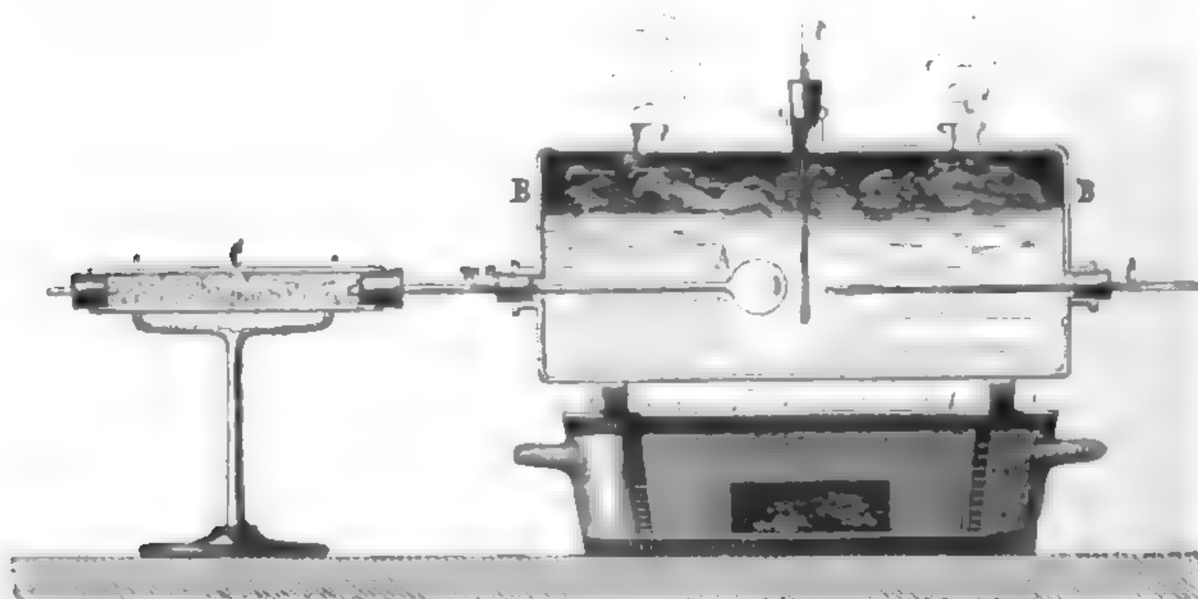


Fig. 216. — Appareil de Gay-Lussac.

contenant des matières desséchantes, telles que du chlorure de calcium. Le thermomètre était placé dans l'intérieur d'une cuve BB que l'on remplissait d'abord de glace fondante; le gaz se contracte et on fait glisser le tube de façon qu'au moment de l'équilibre de température, l'index arrive au niveau de la tubulure et que toute la masse de gaz se trouve ainsi à 0. Le tube étant divisé en parties

d'égale capacité et le réservoir ayant été préalablement jaugé, on connaît le volume V que le gaz occupe à la pression extérieure H donnée par un baromètre. On porte alors l'appareil à une température donnée T, par l'action du fourneau sur lequel repose la cuve, et on a la précaution de faire mouvoir la tige du thermomètre, de façon que l'index arrive au niveau de la tubulure au moment de l'équilibre. Le gaz occupe à la nouvelle température un volume V' exprimé en divisions du tube; la pression peut d'ailleurs avoir varié d'une expérience à l'autre; supposons qu'elle soit devenue H'. Il est facile de déduire de ces données la dilatation de l'unité de volume du gaz de 0 à T, en supposant que la pression n'ait pas varié. Soit en effet D cette dilatation, le volume initial du gaz V devient à T° par définition $V(1+D)$. Mais ce gaz occupe à la pression H' un volume V'; ramené à la pression H, ce volume deviendrait $V'\frac{H'}{H}$. D'ailleurs les divisions à la température T se sont dilatées; chacune d'elles est devenue $1+KT$, K étant le coefficient de la dilatation du verre; l'expression réelle du nouveau volume de gaz, ramené à la pression H, est donc $\frac{V'(1+KT)H'}{H}$; on a donc l'égalité

$$V(1+D) = V'(1+KT)\cdot\frac{H'}{H},$$

de laquelle on déduira la valeur de D et, par suite, celle du coefficient moyen de dilatation $\frac{D}{T}$.

Par l'emploi de cette méthode Gay-Lussac est arrivé aux conclusions suivantes :

1° Tous les gaz se dilatent de la même quantité entre les mêmes limites de température;

2° Le coefficient de dilatation est indépendant de la pression.

Il trouva d'ailleurs pour le coefficient de dilatation de l'air entre 0 et 100° le nombre 0,00375.

Ces lois, qui, combinées avec la loi de Mariotte, ont servi pendant longtemps de définition mécanique de l'état gazeux, ne sont pas rigoureusement exactes et il convient de faire, à leur sujet, les mêmes restrictions qu'à propos de la loi de Mariotte elle-même. Quant à la valeur absolue du coefficient de dilatation de l'air, elle

est très-sensiblement erronée ; cette valeur, d'après les expériences plus précises qui ont été faites depuis, est exprimée par le nombre 0,00366.

218. Expériences de M. Regnault. — L'appareil employé par Gay-Lussac présentait une imperfection grave : c'est que l'index de mercure ne constitue qu'une séparation insuffisante du gaz sur lequel on opère d'avec l'air extérieur ; une portion de ce gaz peut donc s'échapper, comme aussi inversement de l'air extérieur peut venir se mêler avec lui ; dans les deux cas l'expérience est inexacte. On peut supposer aussi que les procédés de dessiccation employés par Gay-Lussac n'étaient pas suffisamment rigoureux. Quoi qu'il en soit, la question de la dilatation des gaz a été reprise par divers physiciens. MM. Pouillet, Rudberg, Magnus, Regnault, ont exécuté, sur ce point, des expériences dont la rigueur est irréprochable et dont le résultat est venu modifier un peu les conclusions de Gay-Lussac.

Nous nous bornerons à décrire ici l'une des méthodes employées par M. Regnault.

L'appareil se compose (fig. 217) d'un ballon de verre à col effilé qui contient le gaz ; il est placé dans une chaudière où se trouve de l'eau que l'on peut porter à l'ébullition.

Un tube à trois branches, en forme de T, fait communiquer le col du ballon, d'une part, avec un système de deux tubes contenant du mercure et formant un véritable manomètre à air libre, d'autre part avec une série de tubes desséchants, en communication eux-mêmes avec une petite pompe pneumatique. Sur la première branche du manomètre se trouve, tout près de la partie capillaire du tube, un point de repère.

Voici maintenant la manière de déterminer, avec cet appareil, le coefficient de dilatation entre zéro et la température T de l'eau bouillante :

On fait d'abord, un certain nombre de fois, le vide dans le ballon, et à chaque fois on laisse rentrer l'air ou le gaz sur lequel on opère ; ceux-ci se dessèchent en passant dans les tubes dessiccateurs. On peut rendre cette dessiccation et plus sûre et plus rapide en élevant la température du ballon. Cette série d'opérations est,

comme l'a prouvé M. Regnault, absolument nécessaire pour enlever les dernières particules d'humidité, qui sont extrêmement tenaces.

Le gaz étant rentré une dernière fois, on entoure le ballon de glace fondante et on abandonne l'expérience à elle-même. Le gaz

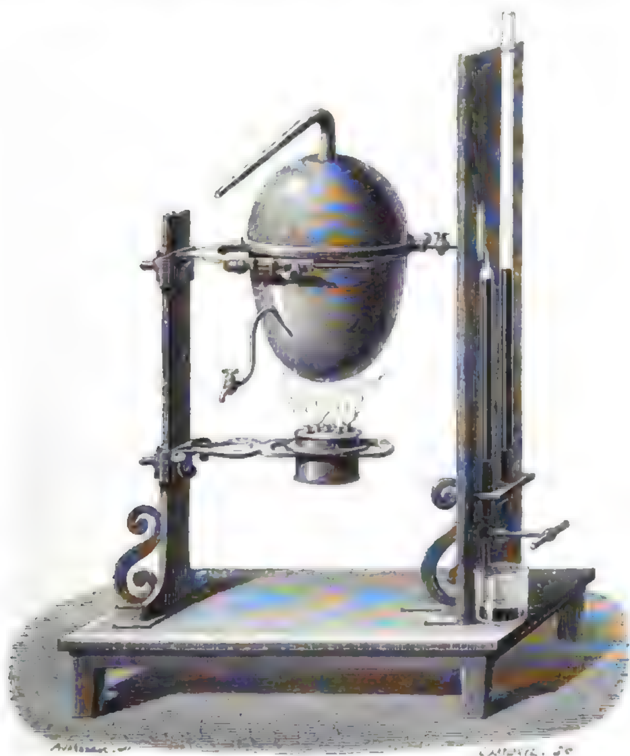


Fig. 217. — Appareil de M. Regnault.

se contracte, il en pénètre une nouvelle partie dans le ballon; mais comme il a traversé la série de tubes dessiccateurs, il est parfaitement sec. L'appareil est alors rempli de gaz; on le met pendant quelques instants par l'intermédiaire des tubes en communication avec l'atmosphère, de sorte que le gaz est à la pression extérieure. On ajoute d'ailleurs du mercure au manomètre, ou on en retranche de façon que le niveau, qui est le même dans les deux branches, corresponde au point de repère. On ferme alors par un trait de flamme l'extrémité du petit tube de verre qui établissait la communication avec les tubes desséchants.

On a donc, par cette opération, isolé une masse de gaz à la pression extérieure H. Cette masse se compose :

1° D'un volume V à la température de zéro, V étant le volume connu du ballon ;

2° D'un volume v, très-petit d'ailleurs, qui s'étend depuis le col du ballon jusqu'au point de repère. Ce volume v est à la température ambiante t ; si on le ramenait à zéro, il deviendrait $\frac{v}{1+\alpha t}$, α étant le coefficient de dilatation du gaz. On a donc dans la première phase de l'expérience une masse de gaz qui, ramenée à zéro, occupe sous la pression extérieure H le volume

$$V + \frac{v}{1+\alpha t}.$$

Cela posé, on enlève la glace qui entoure le ballon, on met de l'eau dans la chaudière et on la porte à l'ébullition ; le volume et la pression du gaz augmentent, le mercure s'abaisse dans la première branche du manomètre et s'élève dans l'autre. Lorsque l'équilibre de température est établi, on verse du mercure par la branche ouverte, de façon à ramener dans l'autre branche le métal au point de repère. Il s'établit alors une différence de niveau h ; la pression extérieure peut d'ailleurs avoir changé et être devenue H' : le gaz est donc soumis à la pression $H' + h$. Son volume se compose de deux parties :

1° Le volume $V(1+KT)$ du ballon, en appelant K le coefficient de dilatation du verre et T la température de l'eau bouillante au moment de l'expérience : ce volume ramené à zéro devient $\frac{V(1+KT)}{1+\alpha T}$;

2° Le volume v du tube jusqu'au point de repère, volume qui, ramené à zéro, devient $\frac{v}{1+\alpha t'}$ en supposant que la température ambiante soit devenue t'. La masse de gaz, dans la seconde phase de l'expérience, occupe donc, sous la pression $H' + h$ et ramenée à la température zéro, le volume

$$\frac{V(1+KT)}{1+\alpha T} + \frac{v}{1+\alpha t'}.$$

On a donc, en écrivant, d'après la loi de Mariotte, que les

volumes sont inversement proportionnels aux pressions, l'équation suivante :

$$(H' + h)\left(\frac{V(1+KT)}{1+\alpha T} + \frac{v}{1+\alpha t'}\right) = \left(V + \frac{v}{1+\alpha t}\right) H,$$

d'où

$$1 + \alpha T = \frac{V(1+KT)}{\left(V + \frac{v}{1+\alpha t}\right)\frac{H}{H'+h} - \frac{v}{1+\alpha t'}}.$$

Pour résoudre cette équation, on emploie un procédé fréquemment usité en physique, et que l'on désigne sous le nom de *méthode des approximations successives* : v étant une quantité très-petite, on le suppose d'abord nul ; on peut alors tirer sans difficulté la valeur de α. On substitue ensuite cette valeur dans les termes correctifs $\frac{v}{1+\alpha t}$, $\frac{v}{1+\alpha t'}$ et on en déduit la vraie valeur de α T. Quant à T, c'est la température de l'ébullition de l'eau; elle est toujours connue, comme on le verra plus loin, si l'on connaît la pression extérieure.

Dans l'expérience qui vient d'être décrite, le gaz conserve sensiblement le même volume, et l'effet de la chaleur se manifeste par un accroissement de pression. On aurait pu opérer autrement et laisser le gaz se dilater librement en conservant la même pression.

Nous ne décrirons pas l'appareil modifié qui sert à cet autre mode d'expérimentation ; nous ferons seulement remarquer que les résultats obtenus par l'un ou l'autre procédé ne sont pas absolument identiques, comme le montre le tableau suivant :

COEFFICIENTS DE DILATATION.

	Volume constant.	Pression constante.
Air	0,003665	0,003670
Azote	0,003668	»
Hydrogène	0,003667	0,003661
Oxyde de carbone	0,003667	0,003669
Acide carbonique	0,003688	0,003710
Protoxyde d'azote	0,003676	0,003720
Cyanogène	0,003829	0,003877
Acide sulfureux	0,003845	0,003903

On voit, d'après ce tableau, que tous les gaz ont leur coefficient propre de dilatation, comme ils ont leur loi propre de compressibilité. Toutefois les gaz non liquéfiables ont à très-peu près le même coefficient de dilatation, ce qui explique la loi trouvée par Gay-Lussac.

Ajoutons que le coefficient de dilatation augmente très-sensiblement avec la pression; ainsi, de 1 à 3 atmosphères environ, le coefficient de dilatation de l'air varie de 0,00367 à 0,00369. L'accroissement est encore plus marqué pour les gaz liquéfiables.

219. Thermomètre à air. — Nous avons dit à propos du thermomètre à mercure que l'on appelle degré la centième partie de la dilatation apparente du mercure dans le verre. Les différents verres qui servent à la construction de l'instrument n'ayant pas la même loi de dilatation, il en résulte, ainsi que nous l'avons remarqué, que les thermomètres à mercure ne sont pas rigoureusement comparables entre eux, particulièrement au delà de 100 degrés.

La dilatation de l'air étant beaucoup plus considérable que celle du mercure, on comprend que les variations qui proviennent des diverses sortes de verres soient beaucoup moins sensibles, et c'est pour cette raison que les physiciens ont adopté le thermomètre à air pour la mesure normale des températures dans les expériences précises.

Tout appareil destiné à la mesure de la dilatation de l'air peut servir de thermomètre; il suffit de considérer, dans l'expression $1 + \alpha T$, T comme inconnu, et de mettre à la place de α la valeur qui a été trouvée entre 0 et 100°, sous volume constant, c'est-à-dire 0,00366.

M. Pouillet avait proposé d'employer l'air comme substance pyrométrique, et il avait construit, sous le nom de pyromètre à air, un instrument avec lequel furent exécutées quelques expériences intéressantes. Le pyromètre de M. Pouillet avait une forme à peu près pareille à celle de l'appareil de M. Regnault décrit précédemment (fig. 217), seulement le réservoir et une portion du tube étaient en platine, de manière à pouvoir résister à l'action des températures les plus élevées. Mais les indications de cet instrument ne sauraient avoir une grande exactitude, parce que le platine jouit de la pro-

priété de condenser sur sa surface de l'air atmosphérique qu'il rend partiellement aux températures élevées. D'ailleurs, à ces températures, le platine devient tout à fait perméable pour quelques-uns des gaz du foyer. Si l'on veut utiliser l'air comme substance pyrométrique, il faut, ainsi que l'ont fait MM. Deville et Troost, le renfermer dans un ballon en porcelaine. Dans quelques-unes de leurs expériences, ces deux savants ont substitué à l'air atmosphérique de la vapeur d'iode dont la densité est beaucoup plus forte, ce qui donne à la méthode un peu plus de sensibilité.

220. Densité des gaz. — A raison de leur très-grande dilatabilité et compressibilité, les gaz éprouvent suivant les circonstances de très-fortes variations de volume. Il convient, par conséquent, quand on définit leur densité, de préciser avec beaucoup de soin la température et la pression à laquelle on les suppose soumis. Ordinairement on prend pour terme de comparaison le poids de l'air et on appelle par suite densité d'un gaz *le rapport entre le poids d'un certain volume de ce gaz à la température de 0° et à la pression de 760 millimètres au poids du même volume d'air à la même température et à la même pression.*

Ce rapport étant connu, on en déduira le poids d'un volume quelconque du gaz considéré, si l'on a mesuré une fois pour toutes le poids absolu de l'unité de volume de l'air dans des conditions déterminées de température et de pression. Ainsi, par exemple, la densité de l'oxygène par rapport à l'air étant 1,1056 et le poids d'un litre d'air à la température de 0 et sous la pression de 760 millimètres étant de $1^{gr},293$, on en conclut que le poids d'un litre d'oxygène dans les mêmes conditions est $1^{gr},293 \times 1,1056 = 1^{gr},429$.

Si au lieu de prendre, pour définir la densité relative, la température de 0 et la pression de 760 millimètres, on eût pris une autre température et une autre pression, la densité aurait été un peu différente. En effet, soit p le poids d'un certain volume de gaz à 0° et sous la pression de 760 millimètres; à la température t et à la pression H le poids du même volume devient

$$p \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{H}{760}. \qquad (a)$$

De même p' étant le poids d'un égal volume d'air à 0 et à 760 mil-

limètres, le poids de ce volume à t et à la pression H a pour expression

$$p' \frac{1}{1+\alpha' t} \cdot \frac{H}{760}. \qquad (b)$$

Le quotient des deux expressions (a) et (b) n'est pas égal à $\frac{p}{p'}$, 1° parce que les deux coefficients α et α' ont en général une valeur différente; 2° parce que le terme correctif $\frac{H}{760}$ n'est qu'approché, puisque chacun des gaz a une loi de compressibilité propre, qui ne coïncide pas avec la loi de Mariotte. Si la loi de Mariotte et la loi de Gay-Lussac étaient rigoureusement exactes, les quantités qui multiplient p et p' dans les expressions (a) et (b) auraient la même valeur, et on pourrait définir la densité d'un gaz *le rapport du poids d'un certain volume de ce gaz au poids du même volume d'air dans les mêmes circonstances de température et de pression.*

221. Mesure de la densité d'un gaz. — Plusieurs physiciens se sont occupés de la mesure de la densité des gaz; nous ferons connaître ici seulement la méthode ingénieuse et précise qui a été employée par M. Regnault. On se sert pour renfermer le gaz d'un ballon à robinet d'une douzaine de litres environ de capacité, on le met en rapport par un tube à trois branches, muni des robinets a et b (fig. 218), d'une part avec une machine pneumatique, d'autre part avec un manomètre à air libre. On fait plusieurs fois le vide, et à chaque fois on laisse rentrer le gaz sur lequel on opère en lui faisant traverser un certain nombre de tubes dessiccateurs, remplis, par exemple, de pierre ponce imbibée d'acide sulfurique. Lorsqu'on suppose que l'humidité a été entièrement enlevée, on entoure le ballon de glace fondante et on le laisse se

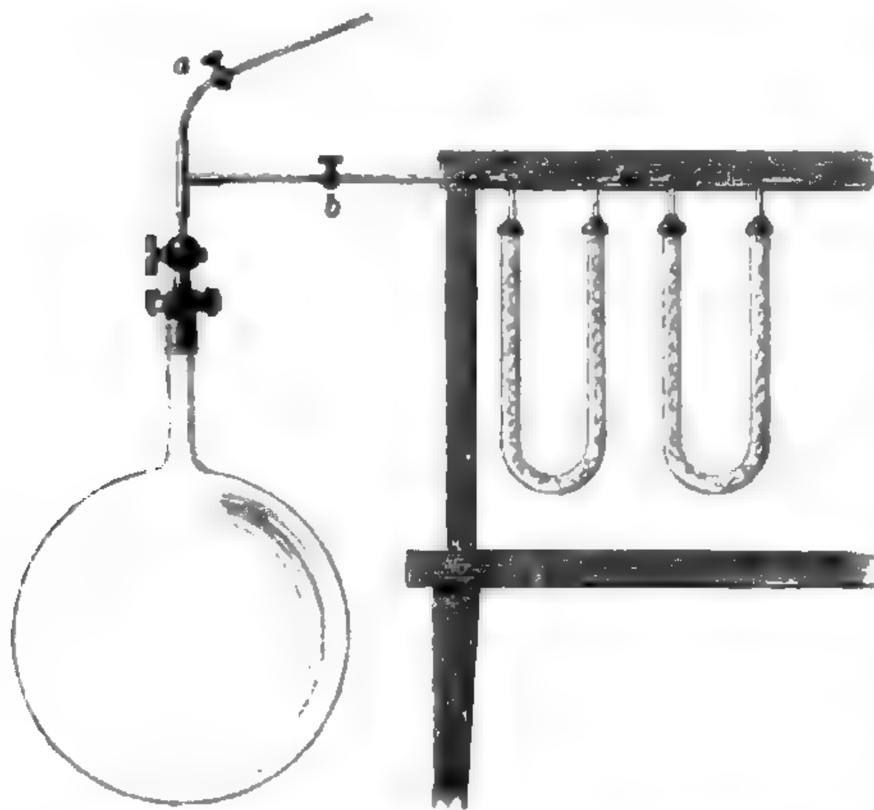


Fig. 218. — Mesure de la densité des gaz.

remplir de gaz à la pression extérieure. L'équilibre de température étant établi, on enlève le ballon, on l'essuie avec soin et on l'accroche à l'un des plateaux d'une balance. A l'autre plateau se trouve suspendu un ballon du *même verre* et de même volume extérieur (fig. 219). On s'est assuré de l'égalité de volume en mesurant directement la poussée par la pesée des ballons dans l'eau. On ajoute la tare nécessaire pour établir l'équilibre et on peut constater que cet équilibre se maintient d'une manière rigoureuse, quelles que soient les variations de la pression et de la température extérieure, parce que ces variations produisent un effet identique sur les deux ballons. C'est dans cet emploi des *ballons compensateurs* que consiste l'originalité du procédé de M. Regnault et aussi sa très-grande précision; car toutes les causes extérieures s'équilibrant, les différences de poids observées ne peuvent tenir qu'aux variations survenues dans le gaz intérieur.



Fig. 219. — Ballon compensateur.

Cela posé, on replace le ballon dans la glace, on le met en communication avec la machine et le manomètre et on fait le vide jusqu'à une limite h. Lorsqu'on le reporte à la balance, l'équilibre des plateaux est rompu et le poids p nécessaire pour le rétablir est évidemment égal au poids d'un volume de gaz sec à 0° et à la pression $H-h$, H étant la pression extérieure. Il suit de là que le poids du gaz sec qui remplirait complétement le ballon à la température de 0 et à la pression de 760 millimètres est

$$p\frac{760}{H-h}.$$

La même expérience faite sur l'air donnerait pour le poids du même volume de ce gaz dans les mêmes conditions

$$p'\frac{760}{H'-h'}.$$

La densité du gaz soumis à l'expérience est donc

$$p\frac{760}{H-h} : p'\frac{760}{H'-h'} = \frac{p}{p'} \cdot \frac{H'-h'}{H-h}.$$

222. Poids du litre d'air. — Les expériences précédentes donnent le poids de l'air sec qui, à 0° et à 760 millimètres de pression, remplit un ballon donné. Pour avoir le poids du litre d'air, il suffit donc de connaître le poids de l'eau qui remplit le même ballon à une température connue. Soit m la différence de poids obtenue dans la pesée du ballon plein d'eau et du ballon plein d'air sec, le poids de l'eau contenue dans le ballon sera évidemment m plus le poids de l'air sec qui est connu préalablement, et que nous désignerons par a. Soit x le volume du ballon, e la dilatation de l'eau depuis 4° jusqu'à la température à laquelle la pesée a été faite; on aura la relation

$$x \frac{1}{1+e} = m + a,$$

qui donne le volume du ballon à une température connue, d'où on déduira le volume à 0°.

Des soins minutieux sont nécessaires pour remplir le ballon d'eau certainement purgée d'air d'une part, et pour être bien sûr également de la température que possède le volume considérable sur lequel on opère. La première condition est surtout difficile à remplir; pour y arriver, M. Regnault expulsait d'abord l'air du ballon en y introduisant une petite quantité d'eau et en faisant ensuite le vide dont l'action était favorisée par une légère élévation de température; d'autre part, de l'eau privée d'air par l'ébullition était poussée par la force élastique de la vapeur dans un tube qui aboutissait au robinet du ballon vide; de cette façon elle ne subissait nulle part le contact de l'air. Ces difficultés d'exécution ont été surmontées par M. Regnault avec son habileté ordinaire et finalement il est arrivé au résultat suivant :

A Paris (au Collège de France), à l'altitude de 60 mètres au-dessus du niveau de la mer, un litre d'air sec à la température de 0° et à la pression de 760 millimètres pèse 1gr,2932. Une pression de 760 millimètres de mercure n'a pas effectivement la même valeur dans les différents lieux du globe par suite des variations de l'intensité de la pesanteur, d'où il suit que le poids du litre d'air défini par les conditions précédentes varie lui-même proportionnellement à la valeur de g. On trouve aisément, d'après cette considération, que : *à la lati-*

tude moyenne de 45° et au niveau de la mer, le poids du litre d'air sec à la température de 0° et sous la pression de 760 millimètres, est égal à 1gr,2927.

Voici le tableau de la densité de quelques gaz :

Noms des gaz.	Densités.	Poids du litre, 0° et 0m,760
Oxygène	1,10563	1,4298
Hydrogène	0,06926	0,08957
Azote	0,97137	1,25615
Chlore	2,4216	3,1328
Oxyde de carbone	0,9569	1,2344
Acide carbonique	1,52901	1,9774
Protoxyde d'azote	1,5269	1,9697
Bioxyde d'azote	1,0388	1,3434
Acide sulfureux	2,1930	2,7289
Acide sulfhydrique	1,1912	1,5363
Acide chlorhydrique	1,2474	1,5891
Hydrogène phosphoré	1,184	1,527
Cyanogène	1,8064	2,3302
Fluorure de bore	2,3124	3,982
Fluorure de silicium	3,573	4,645
Gaz des marais	0,559	0,727
Gaz oléfiant	0,985	1,274
Gaz ammoniac	0,5967	0,7697

223. Tirage des cheminées. — La dilatation de l'air, et, par suite, son changement de densité, produit le mouvement de ce fluide dans les cheminées, c'est-à-dire ce qu'on appelle le tirage. En effet, on peut considérer la colonne d'air contenue dans la cheminée, et une colonne extérieure de même longueur, comme formant un système de vases communiquant par la partie inférieure, c'est-à-dire par la cheminée elle-même. Au-dessus des deux colonnes les pressions ont la même valeur, mais la température du tuyau de la cheminée étant moyennement plus grande que la température extérieure, il s'ensuit que la colonne extérieure a, relativement à la colonne intérieure, un excédant de poids en vertu duquel l'air froid se précipite continuellement dans l'intérieur de la cheminée. La vitesse avec laquelle ce mouvement a lieu est évidemment d'autant plus grande que la hauteur de la cheminée est elle-même plus considérable. On

démontre que théoriquement cette vitesse est donnée par la formule

$$v = \sqrt{2g\alpha\,(t' - t)\,h},$$

dans laquelle g est l'intensité de la pesanteur, a le coefficient de dilatation de l'air, h la hauteur de la cheminée, t la température extérieure et t' la température moyenne de l'air contenu dans le tuyau de la cheminée. Ces simples explications suffisent pour se rendre compte des causes qui tendent à produire ou à empêcher un bon tirage.

Ainsi, l'une des causes les plus fréquentes d'un mauvais tirage est une ouverture trop grande dans la chambre et surtout trop élevée au-dessus du foyer. Il est clair que par cette ouverture béante, de l'air qui ne passe pas par le foyer, qui, par conséquent, ne s'échauffe pas, est admis dans le tuyau et abaisse la température moyenne de la colonne ascendante. Il est clair aussi qu'une section trop grande du tuyau produirait le même effet. Dans les anciennes cheminées ces deux défauts étaient très-sensibles.

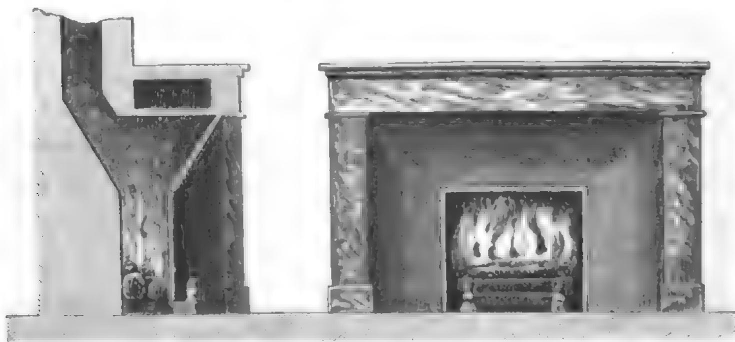


Fig. 220. — Cheminée de Rumford.

Rumford a le premier cherché à en améliorer rationnellement les conditions. Il a, comme le montre la figure, réduit notablement l'ouverture et la profondeur du foyer. En outre, des plaques polies et inclinées dirigent, d'une part, l'air sur le foyer, et de l'autre produisent une diffusion de la chaleur dans l'intérieur de la chambre.

Le rideau ou tablier (fig. 221) indiqué par L'Homond constitue une amélioration notable. En effet, à l'aide de ce mécanisme aucune portion de l'air n'échappe à l'action complète du foyer, il y a donc un réchauffement notable de la colonne ascendante,

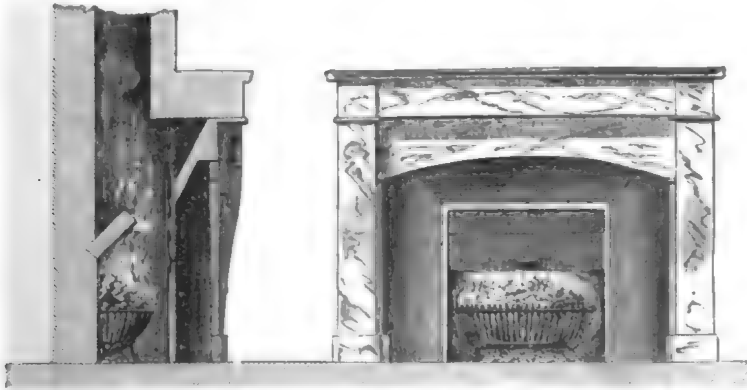


Fig. 221. — Cheminée à tablier.

et par suite un accroissement considérable de vitesse. Le rideau permet d'ailleurs de fermer complétement la cheminée quand le feu est éteint et de conserver ainsi plus longtemps la chaleur de la pièce.

224. **Poêles calorifères.** — Dans le chauffage par cheminées, on n'utilise guère que la chaleur rayonnante du foyer, et la plus grande partie même de celle-ci s'échappe au dehors sans produire d'effet. Ce genre de chauffage, agréable et hygiénique incontestablement, est donc fort peu économique. Le chauffage par poêles est, au contraire, très-économique, car il restitue en grande partie à la chambre, sous forme rayonnante, la chaleur absorbée par ses parois, chaleur qui est perdue en grande partie dans une cheminée. Mais ils ont l'inconvénient grave de ne pas donner lieu à un renouvellement suffisant de l'air. Ils diminuent aussi d'une façon fâcheuse l'état hygrométrique de l'air, d'où résulte une évaporation rapide et fatigante à la surface du corps et dans l'intérieur des organes de la respiration. C'est pour atténuer ce dernier inconvénient qu'on place sur le poêle un vase contenant de l'eau qui rend à

l'air un degré d'humidité convenable. Les appareils aujourd'hui fort répandus et appelés poêles calorifères sont très-supérieurs aux poêles ordinaires; ils produisent le renouvellement de l'air en appelant, par des moyens variables d'ailleurs, un courant de ce fluide frais puisé au dehors et pénétrant dans la salle après s'être échauffé par son contact sur la surface de chauffe.

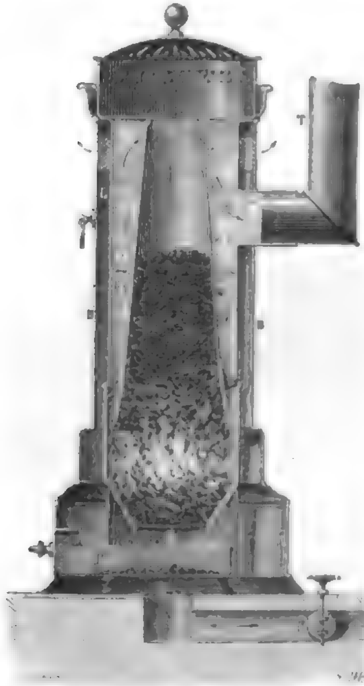


Fig. 222. — Poêle calorifère.

La figure 222 représente un des systèmes les plus simples. G est la grille, U le foyer; le cendrier F a une porte percée de trous, par lesquels s'introduit l'air qui alimente la combustion.

Le foyer est fermé supérieurement par un couvercle que l'on n'enlève que pour mettre le combustible. Une seconde enveloppe B détermine un espace restreint L qui s'échauffe beaucoup. Cet espace communique avec le dehors par un canal A et avec l'intérieur de la chambre par des bouches placées à la partie supérieure de l'appareil. Cette disposition donne lieu à un courant d'air très-vif venant de l'extérieur, et que l'on peut d'ailleurs modérer à l'aide de la clef P.

CHAPITRE XXIV.

FUSION ET SOLIDIFICATION.

225. Fusion. — Lorsque l'action de la chaleur se prolonge sur un corps, il arrive un moment où l'état physique du corps change; si par exemple il est solide, il passe à l'état liquide : on dit qu'il *fond*. Ce phénomène important porte le nom de fusion. Il se produit pour chaque corps à une température déterminée et spécifique, qui constitue un élément physique essentiel pour la connaissance complète du corps lui-même. Le tableau suivant fait connaître le point de fusion d'un certain nombre de corps.

TABLEAU.

	Degrés.		Degrés.
Mercure	— 39	Zinc	360
Glace	0	Antimoine	432
Beurre	33	Bronze	900
Suif	33	Argent pur	1000
Blanc de baleine	49	Cuivre	1150
Stéarine	55	Or monétaire	1180
Cire jaune	62	Or pur	1250
Cire blanche	68	Fonte blanche très-fusible	1050
Acide stéarique	70	— peu fusible	1100
Phosphore	44	Fonte grise très-fusible	1100
Potassium	63	— 2e fusion	1200
Sodium	95	Fonte manganésée	1250
Iode	107	Aciers les plus fusibles	1300
Soufre	110	— les moins fusibles	1400
Étain	230	Fer doux français	1500
Bismuth	562	Fer martelé anglais	1600
Plomb	320	Platine	2000

Quelques corps, le charbon par exemple, ont résisté jusqu'à présent à toutes les tentatives qu'on a faites pour les faire passer à l'état liquide; ceci ne doit être attribué qu'à l'insuffisance des moyens qu'on a pu mettre en usage, et ne saurait altérer la généralité du principe que tous les corps, suivant la température à laquelle ils se trouvent, peuvent affecter l'état solide, l'état liquide ou même l'état gazeux. Il faut remarquer d'ailleurs que le corps soumis à l'expérience peut, à une température inférieure à laquelle aurait lieu la fusion, éprouver une véritable décomposition. Si, par exemple, on essaye de fondre de la craie, en la plaçant au-dessus d'un foyer intense, cette substance, qui n'est autre chose que du carbonate de chaux, laisse dégager, à un certain moment, son acide carbonique et il ne reste que la chaux; mais si on a soin d'enfermer la matière dans un vase clos, de petite capacité, une portion seulement se décompose et, à la pression qu'exerce le gaz dégagé, une autre partie se conserve intacte et peut être amenée à l'état liquide. Un grand nombre d'expériences de ce genre ont été faites il y a un siècle environ par le physicien Halles et ont donné des résultats très-intéressants.

Le passage de l'état solide à l'état liquide se fait assez ordinairement d'une manière brusque; mais il n'en est pas toujours ainsi. Le verre, par exemple, avant d'arriver à l'état liquide parfait, passe par une série d'états intermédiaires pendant lesquels il présente une consistance pâteuse qui permet de l'étirer en fils d'une très-grande finesse, de le souffler et de lui donner facilement les formes les plus diverses. Cette propriété est la base fondamentale du travail du verre, qu'on ne coule, dans le sens ordinaire du mot, que dans des cas très-restreints.

226. Constance de la température pendant la fusion. — Pendant tout le temps que la fusion s'accomplit, la température demeure constante. Ainsi, que l'on place au-dessus d'un foyer un vase contenant de la glace, celle-ci fond d'autant plus rapidement que le foyer est plus intense; mais si l'on a la précaution d'agiter le mélange de glace et de liquide, un thermomètre placé dans l'intérieur accusera invariablement la température zéro; ce n'est que lorsque toute la glace sera fondue, que la température s'élèvera.

Que l'on chauffe de même du soufre contenu dans un ballon de verre, on verra la température accusée par un thermomètre s'élever graduellement et atteindre 110° environ. A ce moment on voit une portion du soufre passer à l'état liquide, et en agitant pendant que la fusion s'opère et jusqu'à ce qu'elle soit achevée, on reconnaît que la température reste invariable.



Fig. 223. — Fusion du soufre.

227. Chaleur de fusion. — Ce phénomène est fort curieux et donne lieu à des conséquences importantes. En effet, le foyer étant en activité fournit continuellement de la chaleur qui semble disparaître puisque le thermomètre demeure stationnaire; d'où l'on conclut que, pour qu'un corps puisse passer de l'état solide à l'état liquide, il faut qu'il absorbe une certaine quantité de chaleur qui ne produit plus aucun effet thermométrique. Les anciens physiciens, qui assimilaient la chaleur à une sorte de fluide très-subtil, impondérable, auquel ils donnaient le nom de *calorique*, appelaient *calorique latent* (de *latere*, être caché) la portion de ce fluide qui produit la fusion sans agir sur le thermomètre. Même en se plaçant à leur point de vue, on peut dire que l'expression est fort impropre, car le passage de l'état solide à l'état liquide est quelque chose d'au moins aussi visible, aussi apparent que le changement de température. Le calorique qui produit le changement d'état n'est donc nullement caché, il se manifeste seulement par un phénomène différent de celui auquel on reconnaît ordinairement son action.

Suivant les idées plus rationnelles qui ont cours aujourd'hui sur la nature de la chaleur, on admet que, dans le passage de l'état solide à l'état liquide, il y a une portion de chaleur qui *disparaît* en effet, et qui correspond au travail mécanique nécessaire pour modifier l'attraction existant entre les molécules du solide, et produire la fusion. C'est un fait tout à fait équivalent à celui dont il a été question à propos des dilatations. On doit donc admettre que, pour fondre un corps, il faut consommer une certaine quantité de cha-

leur, afin de produire le travail moléculaire spécial qui constitue le changement d'état. Nous appellerons la chaleur employée dans cette circonstance *chaleur de fusion*.

228. Chaleur de fusion de la glace. — La chaleur de fusion est naturellement spécifique, elle doit être en plus ou moins grande quantité, suivant qu'il s'agit d'une substance ou d'une autre. L'expérience suivante, dont la première idée est due à Black, permet de mesurer approximativement la chaleur de fusion de la glace. On prend, d'une part, un kilogramme de glace à 0, et, d'autre part, un kilogramme d'eau à 79°; on verse l'eau sur la glace et on agite rapidement. La glace fond et l'on obtient 2 kilogrammes d'eau à 0. Cette intéressante expérience prouve que toute la chaleur qu'il avait fallu employer pour élever la température de l'eau de 0 à 79° a été absorbée pour fondre un kilogramme de glace; elle montre donc d'une manière directe que, pour fondre un kilogramme de glace, il faut exactement la même quantité de chaleur que pour élever la température d'un kilogramme d'eau de 0 à 79°.

Les physiciens appellent *une calorie* la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un kilogramme d'eau de 0 à 1°. On voit donc que, pour fondre un kilogramme de glace, il faut une quantité de chaleur à peu près égale à 79 calories.

Telle qu'elle vient d'être décrite, l'expérience n'est pas susceptible de donner un résultat rigoureusement exact, elle a besoin d'être exécutée avec de minutieuses précautions, qui seront indiquées plus loin au chapitre XXXI. Nous ne la donnons que comme un moyen de faire concevoir la manière dont a été déterminée la chaleur de fusion de la glace.

En comparant la chaleur de fusion de la glace à celle de quelques autres corps qui sont indiquées dans le chapitre déjà cité, on remarquera qu'elle leur est très-notablement supérieure. La glace est donc de tous les corps solides celui qui est le plus *difficile à fondre*, en entendant, par cette proposition un peu singulière au premier abord, que c'est le corps qui consomme, dans sa fusion, la plus grande quantité de chaleur. Absolument parlant, elle en consomme une quantité très-considérable. Ce fait a une très-grande importance dans la nature, il nous explique la lenteur avec laquelle

s'accomplit le phénomène du dégel. Cette lenteur est salutaire, car si toute la masse de glace, ou de neige, qui s'est accumulée pendant les jours où sévissait un froid rigoureux, venait tout à coup à passer à l'état liquide, il pourrait en résulter de véritables désastres. Même dans les conditions où il s'accomplit, le dégel est encore quelquefois redoutable, et pourtant pour chaque kilogramme de glace fondue, il faut une quantité de chaleur égale à 79 calories. Il résulte de là une diminution graduelle et très-sensible de la quantité de chaleur agissante, et, par suite, une variation moins prononcée de la température extérieure.

229. Dissolution. — Le passage de l'état solide à l'état liquide peut se faire autrement que par l'action directe de la chaleur; il a lieu aussi par l'action d'un liquide. C'est ce qui arrive par exemple quand on met un fragment de sucre ou de sel dans l'eau; on dit que les corps *fondent* dans l'eau. Ce phénomène, dont l'analogie avec la fusion n'est pas contestable, porte le nom de dissolution. La dissolution s'effectue plus ou moins facilement suivant la température, et n'exige point une température fixe comme la fusion. Le travail moléculaire propre à la dissolution n'est sans doute pas identique à celui de la fusion, du moins on ne saurait l'affirmer, mais en tout cas c'est un travail réel, et qui doit par conséquent donner lieu à la consommation, à la disparition d'une certaine quantité de chaleur.

Aussi, si l'on vient à dissoudre rapidement un corps solide dans l'intérieur de l'eau, on observe, en général, un abaissement de température. Cet abaissement peut être même très-considérable; ainsi la dissolution de l'azotate d'ammoniaque dans un poids égal d'eau peut faire descendre le thermomètre de 20 à 25°.

230. Mélanges réfrigérants. — Sur ce principe repose la confection des mélanges réfrigérants. Ces mélanges sont formés de deux substances, dont l'une au moins est solide, et qui, par leur action mutuelle, passent à l'état liquide, passage qui amène nécessairement un abaissement de température. Dans les laboratoires, on emploie le plus ordinairement la glace et le sel, dans les proportions de deux parties de la première substance et une de la seconde; on obtient très-aisément par ce moyen une température de 15 à 18°

au-dessous de zéro. Dans ce mélange il y a à la fois fusion de la glace et dissolution du sel dans le liquide formé, ce qui produit une double absorption de chaleur.

On peut se servir de mélanges qui ne renferment pas de glace, et on a ainsi un moyen souvent employé de congeler l'eau artificiellement. Divers appareils ont été construits dans ce but pour les usages de l'économie domestique, et portent le nom de glacières.

Notre figure représente une glacière à bascule. Elle est formée

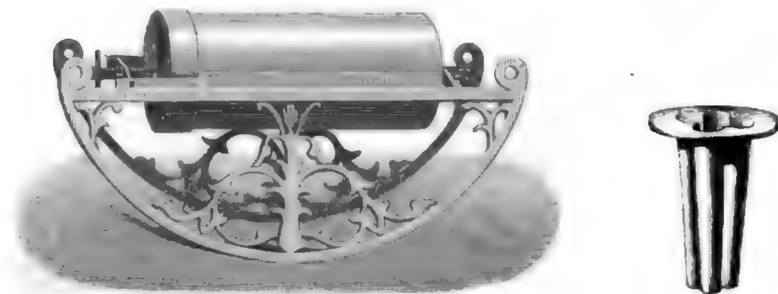


Fig. 224. — Glacière à bascule.

d'un cylindre métallique, contenant le mélange réfrigérant (acide chlorhydrique et sulfate de soude). Dans le cylindre on place un moule formé de deux surfaces concentriques retenant l'eau dans leur intervalle, disposition qui a pour effet de multiplier les points de contact de l'eau à congeler avec le mélange. L'appareil placé sur un chariot peut recevoir un mouvement de bascule qui active beaucoup l'opération. Nous donnons plus loin le tableau de quelques-uns des mélanges frigorifiques les plus employés, avec les proportions qui correspondent au maximum d'effet. Ces proportions jouent évidemment un rôle, puisque la quantité de chaleur absorbée, dans un temps donné, dépend de la quantité de matière qui passe à l'état liquide. Il peut y avoir d'ailleurs entre les matières agissantes une action chimique qui donne lieu toujours à un dégagement de chaleur ; le sens du phénomène final dépend de la prédominance de l'un ou l'autre des effets inverses. Ainsi, le mélange de quatre parties d'acide sulfurique et d'une partie de glace donne lieu à une élévation de tempé-

rature de 50 à 60°, tandis que quatre parties de glace et une d'acide produisent un froid de — 15° à — 20°.

TABLEAU.

	Proportions à prendre.	Abaissement de température.
Neige ou glace pilée	2	de 0 à — 21°.
Sel marin	1	
Neige	3	de 0 à — 48°.
Chlorure de calcium hydraté	4	
Nitrate d'ammoniaque	1	de + 10 à — 15°.
Eau	1	
Chlorhydrate d'ammoniaque	5	de + 10 à — 15°.
Nitrate de potasse	5	
Sulfate de soude	8	
Eau	16	
Sulfate de soude	8	de + 10 à — 17°.
Acide chlorhydrique	5	

231. Solidification ou congélation. — La solidification est le phénomène inverse de la fusion; c'est le passage à l'état solide d'un liquide dont on abaisse graduellement la température. Cette transformation doit être considérée comme générale en elle-même, bien que quelques liquides, comme l'alcool absolu, le sulfure de carbone, n'aient pu encore être congelés. La température de la congélation est théoriquement la même que celle de la fusion; ainsi on peut indifféremment dire que l'eau se congèle à 0, ou que la glace fond à 0. Toutefois lorsqu'une masse liquide est abandonnée à elle-même, si elle est en petite quantité et qu'on ait soin de la soustraire à toute agitation mécanique, elle peut se refroidir notablement au-dessous du point de fusion sans se congeler. Ce phénomène, qu'on désigne sous le nom de *surfusion*, s'observe facilement lorsque le liquide est renfermé dans des vases très-étroits. Mais quand il est dans cet état, la moindre agitation, le contact d'une portion du solide qui doit se former, déterminent immédiatement la solidification.

232. Chaleur dégagée dans la congélation. — Au moment où la congélation se produit, le thermomètre remonte immédiatement

jusqu'à la température du point de fusion. On fait très-commodément l'expérience en se servant d'un petit vase de verre contenant de l'eau dans laquelle plonge le réservoir d'un thermomètre à mercure. A l'aide d'un mélange réfrigérant on abaisse facilement la température jusqu'à —10° ou — 12° sans que l'eau se congèle. On donne alors une secousse un peu brusque à l'instrument, la solidification a lieu et le mercure remonte à 0.

Cette production de chaleur est la conséquence naturelle de ce fait que, pour le retour des molécules à la position qui convient à l'état solide, il faut un travail des forces intérieures qui se trouve transformé en chaleur. Cette quantité de chaleur est évidemment la même que celle qui a disparu dans la fusion, puisqu'elle correspond au même travail effectué en sens inverse. On expliquait ce fait dans la théorie des chaleurs latentes, en disant que la chaleur redevient libre ou sensible. On peut montrer cette production de chaleur par un autre genre d'expérience. Qu'on chauffe une certaine masse de plomb jusqu'à la température de sa fusion (320°) en ayant soin toutefois de s'arrêter avant que la fusion commence ou au moment où elle a à peine commencé, et qu'on plonge cette masse dans de l'eau à 10°, par exemple, la température de l'eau s'élèvera d'une certaine quantité. Qu'on répète la même expérience avec le plomb quand il est entièrement fondu, mais toujours toutefois à la température de 320°, on observera un accroissement de température beaucoup plus sensible; c'est que le plomb en se solidifiant au contact de l'eau dégage une certaine quantité de chaleur.

233. Cristallisation. — Lorsque le passage de l'état liquide à l'état solide se fait lentement, il arrive assez fréquemment que les molécules se groupent de manière à présenter des formes régulières et géométriques : c'est en cela que consiste la cristallisation, et les corps réguliers obtenus se nomment cristaux. La forme cristalline que présente une substance est étroitement liée à la nature de la substance elle-même, et peut servir à la faire reconnaître; c'est donc un caractère extrêmement important, et qui est dans les corps du règne inorganique l'équivalent pour ainsi dire de la forme dans les êtres organisés.

Pour mettre en évidence la forme cristalline d'un corps qui passe de l'état liquide à l'état solide, on opère de la manière suivante : Supposons, par exemple, qu'il s'agisse du bismuth ; on le fait fondre d'abord dans une capsule et on l'abandonne ensuite à lui-même. La solidification doit se faire naturellement en premier lieu au contact des parois et à la surface, points qui reçoivent plus directement l'impression refroidissante de l'extérieur ; il doit donc arriver que lorsque la couche supérieure vient de se solidifier, une partie du métal est encore dans l'intérieur à l'état liquide. Si à ce moment on enlève la croûte supérieure et qu'on fasse écouler le bismuth encore liquide, on verra les parois de la capsule recouvertes d'une multitude de cristaux en forme de trémie et d'un très-agréable effet. Si l'on attendait trop longtemps, toute la masse se solidifiant, les différents cristaux se pénétreraient mutuellement, et l'on n'observerait aucune structure régulière. Un grand nombre de solides se trouvent dans ce cas ; la glace en offre un exemple extrêmement curieux.

234. Fleurs de la glace. — La tendance de la glace à prendre une forme cristalline est rendue sensible par les dessins de feuilles de fougère que l'on observe sur les carreaux de vitre en hiver,

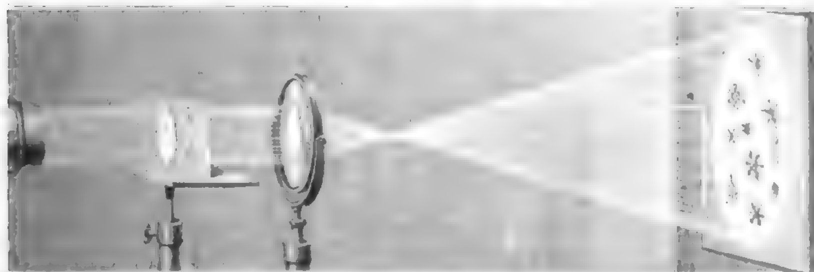


Fig. 225. — Projection des fleurs de la glace.

quand l'eau vient à s'y congeler ; elle est surtout remarquablement accusée par la symétrie des figures que présentent les flocons de neige (voyez chap. XXVIII). Toutefois, dans un bloc de glace, cette structure cristalline n'apparaît en aucune façon, par suite de l'enchevêtrement ou de la soudure des cristaux les uns avec les autres, et l'on peut même dire que cette matière en masse paraît tout à fait

amorphe. M. Tyndall a réussi néanmoins, dans une très-intéressante expérience, à *décristalliser* pour ainsi dire de la glace d'une façon graduelle, et à montrer les éléments cristallins dont elle se compose. On prend une plaque de glace telle qu'elle se forme naturellement en hiver à la surface de l'eau et on fait arriver sur elle, perpendiculairement aux faces de congélation, un faisceau de lumière solaire. Une lentille placée au delà (fig. 225) permet de projeter sur un écran l'image de ce qui se passe au sein même du bloc. La figure 226 montre les apparences que l'on observe successivement sur l'écran. C'est d'abord un petit cercle lumineux, sur lequel s'embranchent des rayons formant comme les pétales d'une fleur dont le cercle serait le pistil. Des altérations nombreuses se produisent d'ailleurs sur les branches elles-mêmes qui se dentellent souvent de manière à représenter des feuilles de fougère analogues à celles qu'on aperçoit sur les carreaux de vitre congelés. Dans cette expérience, la chaleur solaire, au lieu de fondre uniformément la masse de glace, ce qui aurait certainement lieu si celle-ci était amorphe, agit successivement sur les différents



Fig. 226. — Fleurs de la glace.

cristaux enchevêtrés et dans l'ordre même où ils se sont formés; il en résulte des espaces réguliers et qui sont remplis par l'eau. Celle-ci absorbant plus de lumière que la glace, donne lieu sur l'écran à des images relativement sombres. Le centre de ces images est généralement brillant, parce qu'il correspond à un espace vide résultant de ce que l'eau occupe moins de place que la glace qui lui a donné naissance.

235. Sursaturation. — La proportion de matière solide qu'un liquide peut tenir en dissolution est variable suivant la température; assez ordinairement, bien que le fait ne soit pas absolument général, elle augmente avec la température elle-même. Il suit de là que, si on abandonne une dissolution saturée à elle-même, l'évaporation ou le refroidissement auront pour effet de diminuer graduellement la proportion de matière qui peut rester dissoute; celle-ci passera donc à l'état solide et généralement sous la forme de cristaux. C'est là même un procédé extrêmement général de cristallisation, que l'on appelle procédé par la *voie humide*. Il peut se produire dans ce cas un phénomène tout à fait analogue à la surfusion.

On introduit dans un tube présentant une partie effilée supérieurement (fig. 227) une dissolution chaude et concentrée de sulfate de soude, on fait bouillir, et on ferme le tube à la lampe au moment où le liquide est en pleine ébullition; par cet artifice l'air se trouve expulsé de l'appareil. La dissolution, abandonnée à elle-même, se refroidit graduellement sans que le solide

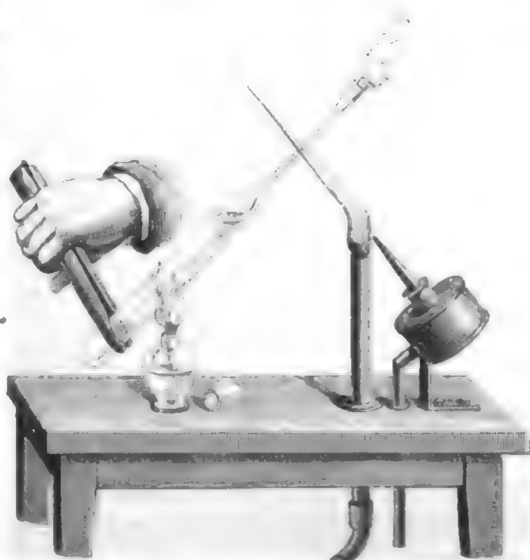


Fig. 227. — Sursaturation de la dissolution de sulfate de soude.

se dépose, bien qu'elle soit *sursaturée.* Mais si on vient à briser la pointe du tube, l'air s'introduit et la cristallisation, commençant aussitôt par la surface, se propage jusqu'au fond du tube ; en même temps il se produit, comme on devait s'y attendre, une élévation très-sensible de température. Si l'accès de l'air ne déterminait pas le phénomène, on le produirait à coup sûr en projetant un petit fragment de sulfate de soude cristallisé dans la dissolution.

236. Changement de volume au moment de la congélation. — Force expansive de la glace. — Lorsqu'un corps passe de l'état liquide à l'état solide, il y a ordinairement diminution de volume; toutefois il y a quelques exceptions fournies par la glace, le bismuth, l'argent et la fonte. A raison de cette circonstance, cette dernière substance est particulièrement propre au moulage, car elle lui permet de pénétrer complétement dans tous les détails du moule. La dilatation de la glace est considérable, elle est d'environ $\frac{1}{14}$; elle se produit d'ailleurs avec une force mécanique extrêmement intense, comparable en tous points à celle qui accompagne le phénomène général de la dilatation. Aussi divers accidents peuvent-ils se produire en hiver au moment des fortes gelées. Les vases, les tuyaux de conduite sont souvent brisés; les pierres de construction elles-mêmes peuvent se fendiller par suite de la congélation de l'eau dont elles sont toujours plus ou moins imprégnées. Quand les gelées sont très-fortes, plusieurs espèces végétales peuvent être compromises, ainsi qu'on a pu le constater pour la vigne, le mûrier, l'olivier dans des hivers très-rigoureux; mais les gelées les plus redoutables sont celles qui se produisent tardivement, au printemps, alors que la séve est déjà en mouvement et que les jeunes pousses ont fait leur apparition. Les désastres qui se produisent trop souvent à cette époque sont dus en partie sans doute à la propriété expansive de la glace, mais ils dépendent aussi de l'action propre du froid que les jeunes organes des végétaux ne sauraient supporter sans périr.

On rend sensible dans les cours de physique la force expansive de la glace par l'expérience suivante :

On remplit d'eau un canon en fer forgé (fig. 228) que l'on

ferme hermétiquement par un bouchon à vis, et on le place dans l'intérieur d'un mélange réfrigérant de glace et de sel. Au bout de quelque temps l'eau se congèle, on entend souvent un bruit assez intense et on constate que le tube s'est déchiré sur une longueur plus ou moins considérable.



Fig. 228. — Rupture d'un canon en fer forgé par la force expansive de la glace.

L'expérience suivante, faite par le major Williams à Quebec, est encore plus frappante. Il remplit d'eau une bombe de 30 centimètres de diamètre et la ferma hermétiquement avec un tampon de bois enfoncé à coups de marteau. La bombe fut exposée au dehors, où la

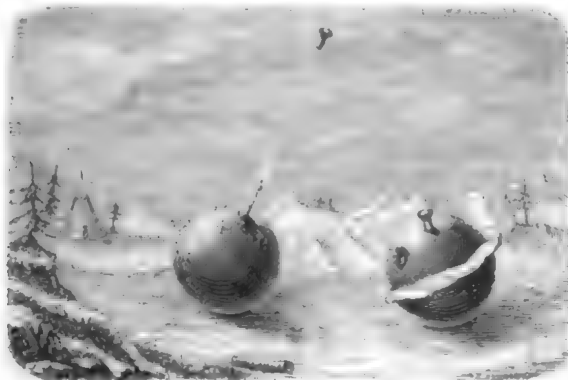


Fig. 229. — Expérience du major Williams.

température était de — 28°. L'eau se congela et le tampon fut lancé à une distance de plus de 100 mètres; il sortit de la bombe en même temps un mamelon de glace de 20 centimètres de longueur environ. Dans une autre expérience la bombe se fendit circulairement, en laissant sortir une lame de glace sur toute son étendue (fig. 229).

C'est en vertu de la dilatation de la glace que celle-ci flotte à la surface de l'eau. Cette circonstance permet à la glace de subir, aussitôt que cela est possible, les impressions calorifiques qui amènent le dégel; s'il en était autrement, elle s'accumulerait au fond des cours

d'eau, où, à raison de la mauvaise conductibilité du liquide, elle pourrait rester pendant fort longtemps, constituant et par sa masse et par sa température un obstacle fâcheux au développement des êtres organisés de toute sorte qui vivent dans le sein de l'eau.

237. Influence de la pression sur le point de fusion. — Puisque la glace en fondant diminue de volume, il y a nécessairement une dépense de travail extérieur, dû à la force qui presse à sa surface. Il doit donc se produire une certaine quantité de chaleur qui contribue en partie à la fusion, et qui diminue d'autant celle qu'il est nécessaire d'employer pour produire le changement d'état. Quand la pression extérieure est faible, on peut en négliger l'effet; mais il n'en est plus de même quand cette pression devient considérable, et on est conduit à admettre que, par le moyen d'une pression énergique, on doit pouvoir produire la fusion de la glace à une température inférieure à zéro. Cette conséquence importante a été vérifiée par M. W. Thomson, en se servant d'un appareil analogue au piézomètre d'Œrstedt, et il a prouvé qu'une pression de 16 atmosphères pouvait abaisser le terme de la congélation d'environ 0°,1. Cette variation est extrêmement petite, et on pourrait hésiter à en admettre la réalité; mais de nouvelles expériences faites par M. Mousson, et dans lesquelles on a fait intervenir des pressions énormes, mettent le fait tout à fait hors de doute.

M. Mousson se sert d'un prisme en acier, percé d'un canal dans toute sa longueur. L'une des extrémités est fermée par un bouchon conique fortement assujetti à l'aide d'une vis; de l'autre côté une sorte de piston en acier fileté supérieurement peut s'avancer dans la cavité. On renverse l'appareil et par l'ouverture inférieure on introduit de l'eau récemment bouillie et un petit index métallique qui naturellement gagne le fond du liquide. On fait congeler la masse, on adapte le bouchon conique et, après avoir redressé l'appareil, on le porte dans un mélange réfrigérant de 18 à 20° au-dessous de zéro. A l'aide d'un levier, agissant sur le piston, on comprime très-fortement la glace; M. Mousson évalue la pression obtenue dans quelques-unes de ses expériences à plusieurs milliers

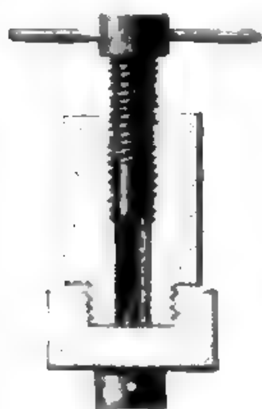


Fig. 230.
Expérience de M. Mousson.

d'atmosphères. En faisant cesser la pression, l'eau se congèle, et en enlevant le bouchon on trouve l'index métallique en contact immédiat avec lui. On en conclut nécessairement que la glace a dû fondre, car ce n'est qu'à cette condition que l'index a pu descendre de la partie supérieure à la partie inférieure de la cavité.

Lorsqu'un corps se dilate en se liquéfiant, ce qui est le cas ordinaire, il y a un travail extérieur accompli par les forces moléculaires et par suite une disparition de chaleur. Si donc on augmente la pression qui agit sur la surface, le travail devenant plus grand, il faudra plus de chaleur pour produire le passage à l'état liquide, et contrairement à ce qui a lieu pour la glace, la pression devra élever le point de fusion. Ce fait a été vérifié par M. Bunsen sur la cire, le blanc de baleine et la paraffine.

238. Regélation. — Les observations précédentes permettent de se rendre un compte satisfaisant de quelques propriétés de la glace, qui présentaient jusqu'à présent une véritable obscurité. Ainsi, la glace est un corps essentiellement *glissant*, et, quel que soit l'état de sa surface, le frottement y est toujours remarquablement faible. Cela peut se concevoir aisément, en admettant qu'un corps placé sur la glace détermine, par sa pression, la formation d'une pellicule liquide qui agit à la manière d'un corps lubrifiant.

La puissance de l'eau pour diminuer le frottement est connue aujourd'hui par des expériences diverses. Nous citerons particulièrement le chemin de fer d'essai, construit par M. Girard, à la Jonchère. Dans ce système le roulement est remplacé par le glissement de patins sur des rails plats, mais avec interposition d'une lame d'eau. Des essais plus directs d'introduction d'eau forcée entre les organes frottants des machines ont établi que le pouvoir *graissant* de l'eau est près de cent fois plus grand que celui des matières lubrifiantes les plus avantageuses.

On explique de même l'expérience si connue du regel. Qu'on prenne deux morceaux de glace et qu'on les applique par deux surfaces tant soit peu étendues l'un contre l'autre, les deux morceaux se soudent aux points de contact et n'en forment plus qu'un. C'est ainsi que les enfants, en pétrissant une boule de neige dans les mains, finissent par en faire une masse dure et presque transparente

de glace. De même la neige qui tombe sur le sommet des montagnes élevées, s'accumulant et se pressant, donne naissance à un *glacier*, formé de glace d'une transparence et d'une homogénéité parfaites. M. Tyndall a pu, en écrasant une masse de glace d'un coup de balancier, produire une médaille continue parfaitement transparente et reproduisant tous les détails de la surface des coins.

L'explication de ces faits est fort simple. Au contact des fragments de glace et sous l'influence de la pression qui les rapproche, se produit une pellicule liquide. Mais celle-ci une fois formée se répand entre les fragments, où elle ne saurait éprouver partout la pression agissante que les solides ne transmettent que dans des directions déterminées. Délivrée pour ainsi dire de cette pression, la pellicule se regèle.

M. Tyndall a donné aux expériences de regélation une forme intéressante sous laquelle on les exécute ordinairement dans les cours de physique. On emploie des moules en buis (fig. 231) que

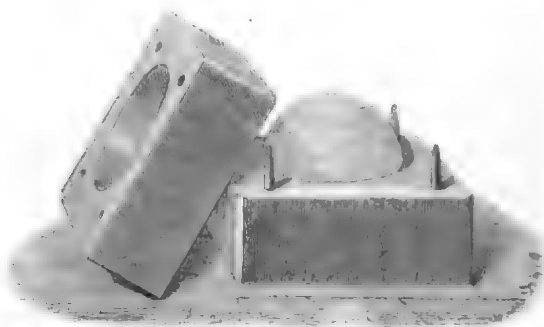


Fig. 231. — Moulage de la glace.

l'on remplit de petits fragments de glace. En soumettant les moules à une forte pression, on en retire une masse continue et transparente ayant la forme du moule lui-même. En variant la forme de celui-ci, on peut obtenir des sphères, des lentilles, des coupes, etc.

239. Plasticité de la glace. — Le regel est une propriété particulière à la glace ; les recherches qu'on a faites pour voir si elle se rencontre dans les corps qui, comme le bismuth et la fonte, se dilatent en se congelant, n'ont abouti qu'à des résultats négatifs.

La conséquence de cette curieuse propriété est de donner à la glace, au moins dans le résultat, la physionomie d'une matière plastique. N'est-ce pas, en effet, le propre de la plasticité de permettre le moulage sous toutes les formes possibles?

C'est aussi en raison de cette plasticité que s'effectue la progression des glaciers qui du sommet des hautes montagnes descendent lentement mais sûrement vers les vallées, se moulant sur les accidents de terrain, surtout dans les parties déclives, s'accommodant enfin comme le ferait une masse molle aux formes et aux dimensions des intervalles à franchir. Toutefois cette plasticité n'est pas réelle ; la glace est véritablement un corps dur et élastique dont on ne saurait changer la forme qu'en le brisant ou en le fondant. Mais la regélation produit, quand cela est nécessaire, tous les effets qui résulteraient d'une plasticité véritable. Ainsi, dans la descente du glacier, le bloc se divise sous l'action des obstacles qu'il rencontre, des fissures se forment d'ailleurs par suite de la fusion produite çà et là ; mais les fragments se ressoudent pour se briser et regeler encore, de sorte que, dans cette masse gigantesque en mouvement, l'esprit doit remarquer la progression majestueuse de l'ensemble et les mouvements particuliers des diverses parties dont la fragilité est, pour ainsi dire, rachetée par la puissance du regel.

CHAPITRE XXV.

ÉVAPORATION.

240. Passage à l'état de vapeur. — La plupart des liquides abandonnés à eux-mêmes en présence de l'air y passent graduellement à l'état de vapeur et finissent par disparaître. Ce phénomène se produit beaucoup plus facilement pour quelques-uns d'entre eux, que l'on dit être plus volatils. Ainsi, qu'on laisse tomber une goutte d'éther sur un corps quelconque, elle disparaît presque instantanément; l'alcool s'évapore aussi avec une assez grande rapidité, tandis que l'eau met un temps plus long à éprouver la même transformation. L'élévation de la température active dans tous les cas le phénomène dont il s'agit, et quand on fait *sécher* un corps devant le feu, on utilise précisément cette propriété de la chaleur de rendre plus rapide l'évaporation de l'eau qui imprègne l'objet soumis à l'expérience. Il n'est pas toujours nécessaire d'ailleurs, pour qu'un corps se vaporise, qu'il soit à l'état liquide. Ainsi, le camphre, l'iode et plusieurs autres substances, passent directement de l'état solide à l'état de vapeur; nous verrons plus loin que la glace émet des vapeurs appréciables à la température de 30° au-dessous de zéro.

Le passage à l'état de vapeur diffère essentiellement de la fusion, en ce qu'il se produit à toute température, tandis que celle-ci n'a lieu qu'à une température déterminée. Toutefois il paraît exister pour chaque substance une température au-dessous de laquelle aucune vaporisation n'a lieu. C'est ainsi, par exemple, qu'à la température ordinaire de 10 à 15° l'acide sulfurique n'émet aucune vapeur. Il en est de même du mercure à zéro; car si l'on

place au-dessus du métal, à cette température, une lame d'or polie, on ne constate sur elle aucune altération. A 10 ou 15° on voit la lame blanchir, ce qui prouve qu'elle s'est alliée avec le mercure, qui a dû, par conséquent, se réduire en vapeur.

A partir de cette limite, qu'il n'est d'ailleurs possible d'assigner que dans un très-petit nombre de cas, la vaporisation se produit à toute température; elle est d'autant plus intense que la température est plus élevée.

241. Vapeurs, gaz. — Il n'y a aucune différence entre les mots *gaz* et *vapeur*. Une vapeur c'est le gaz dans lequel se transforme un liquide par l'évaporation; un gaz doit toujours être considéré comme la vapeur d'un certain liquide. On se sert toutefois particulièrement du mot vapeur quand il s'agit de corps que nous voyons habituellement à l'état liquide ou solide, comme l'eau, le soufre, etc., tandis qu'on réserve le mot gaz pour les corps qui ne sont connus sous un autre état que dans des conditions exceptionnelles, ainsi que cela a lieu, par exemple, pour l'acide sulfureux, l'acide carbonique, le gaz ammoniac, etc. Il y a au surplus un petit nombre de gaz qu'on n'a pas encore pu obtenir sous une autre forme, ce sont : l'*oxygène*, l'*hydrogène*, l'*azote*, le *bioxyde d'azote*, l'*oxyde de carbone* et l'*hydrogène protocarboné*; on leur donne quelquefois le nom de *gaz permanents*.

242. Force élastique des vapeurs. — Tension maxima. — La propriété caractéristique des gaz, c'est-à-dire l'expansibilité ou la force élastique, peut se manifester facilement dans les vapeurs au moyen de l'expérience suivante :

On se sert d'un ballon en verre A (fig. 232), dont la garniture supérieure en métal présente deux ouvertures. L'une d'elles peut être mise en communication avec un manomètre à air libre; l'autre est munie d'un ajutage à robinet R. On commence par faire le vide dans le ballon, en mettant l'ajutage R en communication avec la machine pneumatique. Le mercure s'élève dans la branche de gauche du manomètre et s'abaisse dans la branche de droite; il s'établit finalement une différence de niveau qui ne diffère de la hauteur du mercure dans le baromètre que de la très-petite quantité représentant la force élastique de l'air laissé par la machine. On

ferme alors le robinet R et on dispose au-dessus de lui un second robinet à entonnoir R', dont la clef n'est point percée de part en part et présente seulement une cavité. On peut, à l'aide de ce robinet, introduire un liquide dans le ballon, sans mettre celui-ci

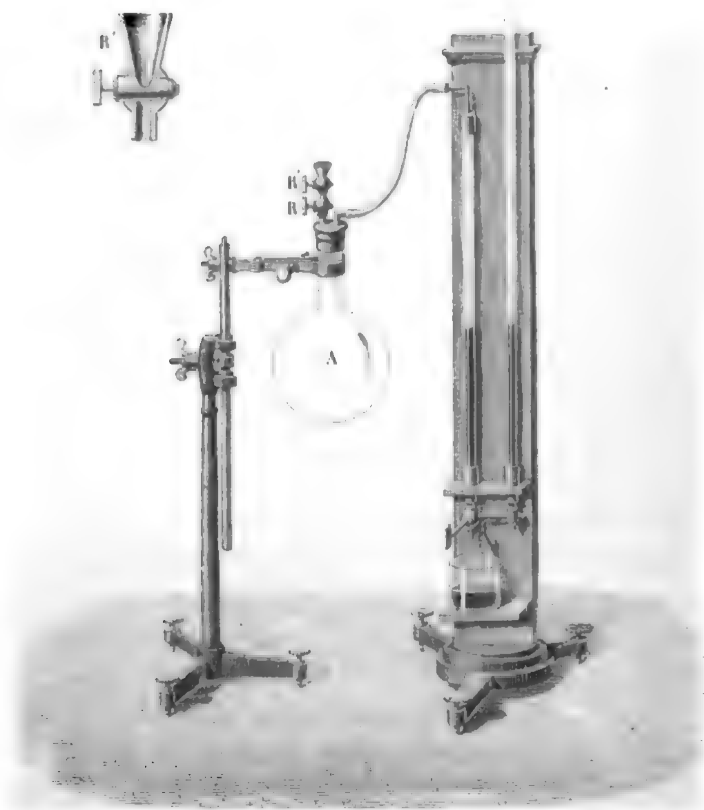


Fig. 232. — Appareil pour étudier la formation des vapeurs.

en communication avec l'air. Il suffit pour cela de remplir l'entonnoir du liquide, d'ouvrir le robinet R et de tourner alternativement la clef de R'. En opérant de cette façon, on reconnaît que dès qu'on a fait passer une petite quantité de liquide dans le ballon, au même instant la colonne de mercure s'abaisse dans la branche de gauche du manomètre, de manière à indiquer un accroissement de force élastique. Cette force élastique augmente successivement

à mesure que la quantité de liquide introduit augmente elle-même. On ne voit pas d'ailleurs de liquide dans le ballon, et on doit en conclure qu'il se vaporise au fur et à mesure de son introduction, et que c'est la force élastique de la vapeur successivement formée qui produit l'abaissement de la colonne mercurielle.

Toutefois cet accroissement de pression a une limite : il arrive un instant où la différence de niveau du mercure dans les deux branches du manomètre demeure constante. A partir de ce moment on aperçoit dans le ballon quelques gouttes du liquide introduit, et si on en fait pénétrer encore, on le voit s'accumuler dans le ballon lui-même. On conclut de cette importante observation que la quantité de vapeur qui peut se former dans un espace vide ne peut pas dépasser une certaine limite. Quand cette limite est atteinte, on dit que l'espace est *saturé*. Il renferme alors de la vapeur dont la tension et, par suite, la densité sont maxima. Il résulte clairement de là que si de la vapeur à une tension moindre que sa tension maxima est renfermée dans un certain espace et qu'on vienne à la comprimer, sa tension et sa densité augmenteront d'abord, mais qu'il arrivera au moment où, la tension maxima étant atteinte, une nouvelle compression ne la changera plus et aura seulement pour effet de faire passer une portion de la vapeur à l'état liquide.

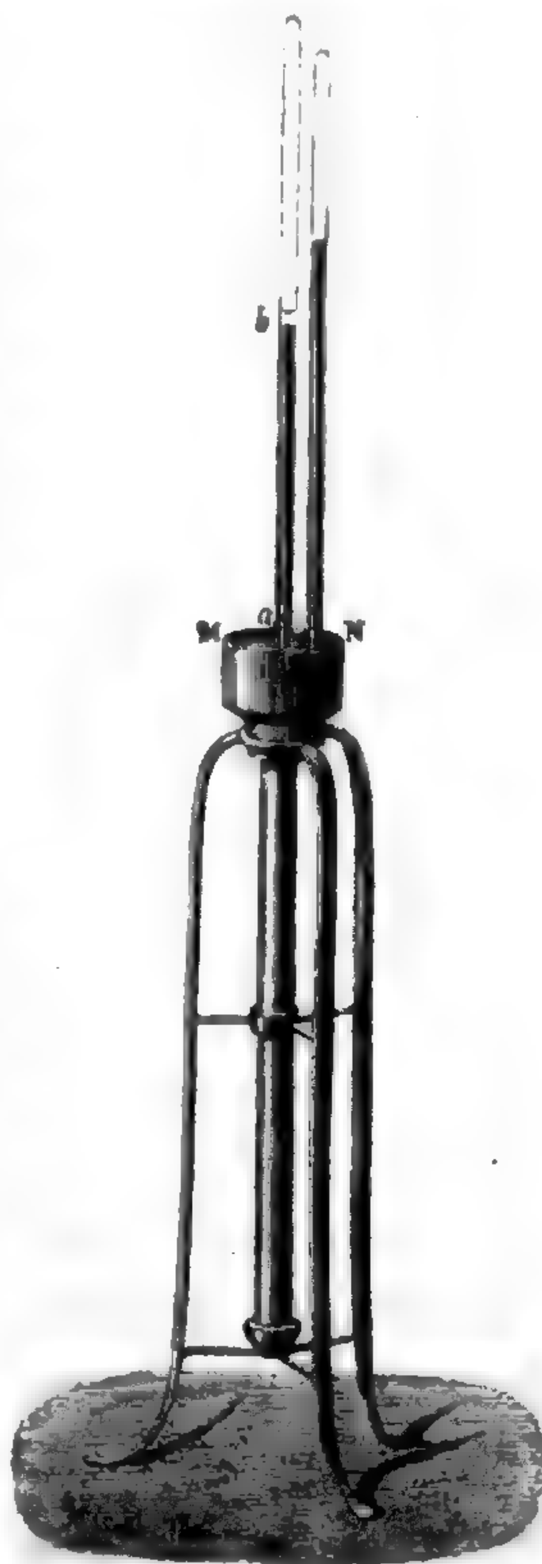


Fig. 233. — Tension maxima des vapeurs.

On vérifie directement cette dernière conséquence à l'aide de l'expérience suivante : On prend un tube barométrique *a b* (fig. 233) que l'on remplit de mercure, à l'exception d'un petit espace où l'on met quelques gouttes d'éther. On a pris le soin d'expulser aussi complétement que possible les bulles d'air qui auraient pu rester adhérentes au mercure. On

renverse alors le tube dans la cuvette profonde MN; l'éther s'élève au-dessus du mercure, s'y réduit en vapeur et produit une dépression notable de la colonne liquide. Si on a pris une quantité d'éther assez petite et qu'on maintienne le tube suffisamment soulevé, on ne voit pas de liquide dans l'espace occupé par la vapeur : cet espace n'est pas saturé. La force élastique de la vapeur d'éther est d'ailleurs donnée par la différence qui existe entre la hauteur de la colonne soulevée et la hauteur d'un baromètre placé à côté. Qu'on enfonce alors graduellement le tube, on reconnaîtra que cette différence va d'abord en croissant, c'est-à-dire que la tension de la vapeur d'éther augmente. Mais si l'on continue à enfoncer le tube, on verra, à un certain instant, de l'éther liquide se former au-dessus du mercure, et, à partir de ce moment, la hauteur de la colonne de mercure soulevée reste invariable; le mouvement de compression ne fait qu'augmenter la quantité de liquide qui se forme aux dépens de la vapeur.

243. Influence de la température sur la tension maxima. — Revenons maintenant à l'appareil (fig. 232), et supposons qu'il y ait dans le ballon une quantité assez notable de liquide introduit. Plaçons le ballon dans une enceinte dont on puisse élever la température; on constate immédiatement à l'aide du manomètre un accroissement de force élastique, en même temps que la quantité de liquide diminue. La tension maxima d'une vapeur augmente donc ainsi que sa densité avec la température, et par suite, pour saturer un même espace, il faut une quantité de vapeur d'autant plus grande que la température est plus élevée. Nous décrirons dans un autre chapitre les procédés d'expérience qui ont été employés pour mesurer les tensions maxima de la vapeur d'eau aux diverses températures, et nous verrons que cette variation est très-rapide.

La figure 234 montre quelles sont les diverses quantités de vapeur d'eau nécessaires pour saturer un même volume aux diverses températures comprises entre — 20 et 35°. Sur la ligne horizontale AB on a porté des longueurs égales qui représentent les températures. Les lignes perpendiculaires mesurent proportion-

nellement le poids de la vapeur à saturation contenue dans un mètre cube à la température correspondante.

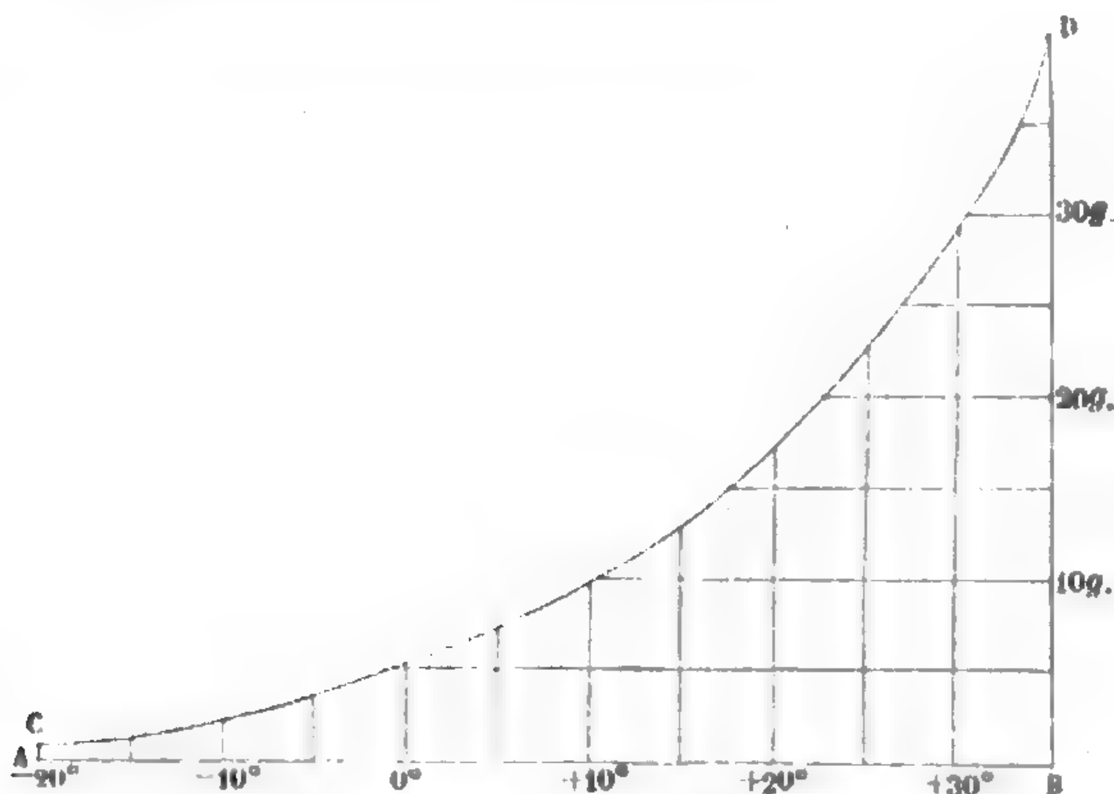


Fig. 234. — Saturations à diverses températures.

244. Mélange des gaz et des vapeurs. — On peut répéter les opérations que nous avons faites avec l'appareil (fig. 232), sans faire le vide dans le ballon, celui-ci renfermant de l'air ou tout autre gaz ou un mélange gazeux quelconque. Les résultats auxquels on arrive sont identiquement les mêmes. Ainsi, à mesure qu'on introduit un liquide, celui-ci se vaporise et la pression augmente graduellement jusqu'à une certaine limite qui correspond à la saturation; à ce moment l'accroissement de force élastique est exactement le même que celui que l'on observait quand le ballon était vide.

La quantité de vapeur qui se forme dans un espace déjà plein d'un gaz est donc la même que celle qui se produirait dans le même espace vide, la saturation se produit dans les mêmes conditions et la densité de la vapeur n'éprouve aucun changement. Il y a toutefois une différence importante à noter : dans le vide, la vapeur se forme, pour ainsi dire, d'une manière instantanée; dans un gaz, au contraire, le phénomène se produit avec une certaine lenteur, d'autant plus grande d'ailleurs que la pression exercée par le gaz est elle-même plus considérable. Il est tout naturel d'admettre, en effet, que la présence de molécules gazeuses constitue une sorte d'obstacle à la dissémination de molécules nouvelles; et il n'est même pas impossible de supposer qu'un

certain degré d'accumulation initiale puisse véritablement diminuer la densité effective de la vapeur produite. Quelques-uns des résultats obtenus par M. Regnault dans ses recherches sur cette question semblent donner une certaine consistance à cette supposition.

La production de la vapeur au sein d'un mélange gazeux est évidemment un phénomène identique à celui du mélange des gaz (chap. XIV); ils admettent l'un et l'autre la même cause, c'est-à-dire la force expansive des fluides aériformes qui donne lieu, à raison de la grande distance qui sépare leurs molécules, à leur pénétration mutuelle. On peut donc énoncer à ce sujet les deux lois suivantes, qui sont l'équivalent et le complément de celle qui se trouve énoncée dans le chapitre déjà cité :

1° *La vapeur se produit en égale quantité et avec la même tension dans un espace plein d'un gaz et dans un espace vide.*

2° *Quand un espace déjà plein d'un gaz se sature de vapeur, on obtient la force élastique totale du mélange en ajoutant à la pression initiale du gaz la tension maxima de la vapeur.*

245. Liquéfaction des gaz. — Le caractère extérieur le plus net auquel on reconnaisse qu'une vapeur est au maximum de tension, c'est la présence du liquide qui lui a donné naissance. Liquéfier un gaz n'est autre chose qu'amener ce corps à sa tension maxima, puisque, à ce moment, la plus petite diminution de volume doit faire apparaître une portion du liquide. Deux moyens distincts peuvent être employés pour réaliser cette opération : le premier est le refroidissement, le second la compression.

Par le refroidissement on diminue graduellement la quantité de vapeur nécessaire à la saturation et l'on peut, par conséquent, atteindre une température telle, que cette saturation soit possible avec la quantité de gaz existante. Par la compression on augmente naturellement la densité, qui peut être amenée, par conséquent, à la valeur qui correspond à la tension maxima.

On se sert fréquemment du premier moyen dans les cours de chimie pour obtenir à l'état liquide des gaz d'ailleurs facilement liquéfiables. La figure 235 représente la disposition de l'appareil à l'aide duquel on obtient ordinairement l'acide sulfureux à l'état liquide.

Le gaz produit dans un ballon, par les procédés ordinaires, passe d'abord dans un flacon laveur, puis dans un tube desséchant et est finalement dirigé dans l'intérieur d'un tube en U entouré d'un mélange réfrigérant de glace et de sel. Un volume gazeux de 50 litres fournit environ 100 centimètres cubes d'acide sulfureux liquide.

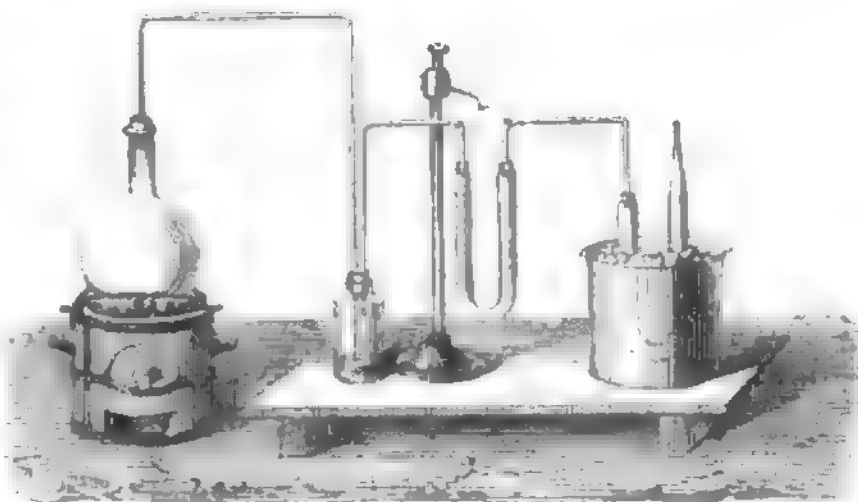


Fig. 235. — Liquéfaction de l'acide sulfureux.

L'appareil de M. Pouillet, que nous avons décrit dans le chapitre XIV, permet de liquéfier la plupart des gaz par voie de compression.

Pour se rendre compte des pressions auxquelles la liquéfaction a lieu, c'est-à-dire, en d'autres termes, de la tension maxima des gaz, on remplace l'un des tubes par un tube plus court renfermant de l'air atmosphérique et servant de manomètre.

M. Pouillet a reconnu ainsi qu'à la température de 10°, l'acide sulfureux se liquéfie à la pression de 2 atmosphères et demie, le protoxyde d'azote à 43, et l'acide carbonique à 45 atmosphères.



Fig. 236. — Appareil de Faraday.

246. Méthode de Faraday. — Faraday a indiqué une sorte de procédé général de liquéfaction dans lequel on utilise à la fois la compression et le refroidissement. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de liquéfier le gaz ammoniac. On se sert d'un tube très-résistant recourbé en forme

de V (fig. 236), dans l'intérieur duquel on a introduit du chlorure d'argent ammoniacal, auquel on fait occuper une des extrémités du tube. On chauffe cette extrémité avec une lampe et on fait plonger l'autre branche dans un mélange réfrigérant de glace et de sel. Le chlorure, qui peut absorber plusieurs centaines de fois son volume d'ammoniac, dégage ce gaz, mais celui-ci, ne pouvant occuper qu'un volume très-restreint, se comprime graduellement et arrive à sa tension et à sa densité maxima. A partir de ce moment le liquide apparaît dans la branche refroidie du tube.

Thilorier a construit, vers 1834, un appareil, devenu classique,

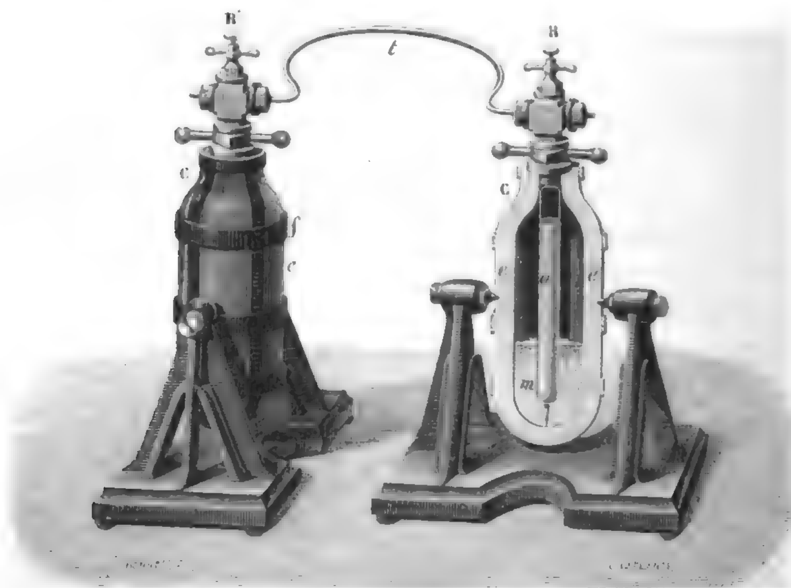


Fig. 237. — Appareil de Thilorier.

fondé sur la méthode de Faraday, dans lequel on liquéfie le gaz acide carbonique. Cette opération exige la pression énorme de 50 atmosphères environ à la température ordinaire. Pour peu que la température s'élève par suite des réactions chimiques qui produisent le gaz, la pression peut facilement atteindre 75 ou 80 atmosphères. On doit juger par là du soin avec lequel doivent être étudiées les résistances des pièces métalliques employées à la construction de l'appareil. Autrefois on construisait l'appareil en

fonte et on l'enveloppait d'une double armature en fer forgé ; mais on l'a modifié depuis à la suite d'une explosion terrible qui coûta la vie à une des personnes qui exécutaient l'expérience.

Actuellement les vases sont formés de trois parties : l'une intérieure en plomb, l'autre *e* qui l'enveloppe complétement en cuivre, et enfin des armatures en fer forgé *ff* (fig. 237) qui consolident le tout. L'appareil se compose de deux récipients distincts. Dans le générateur C on place du bicarbonate de soude, et un tube vertical *a* ouvert supérieurement qui contient de l'acide sulfurique. En imprimant au vase un mouvement d'oscillation autour de deux tourillons qui le supportent à peu près par son milieu, l'acide sulfurique se déverse graduellement et le gaz acide carbonique se dégage et se liquéfie dans l'intérieur. On réunit alors le générateur et le récipient C' par le tube *t* et on ouvre les robinets R et R'. Aussitôt que les deux espaces sont en communication, l'acide carbonique liquide vient se rendre dans le condenseur dont la température est moindre que celle du générateur et joue le rôle de la branche refroidie de l'appareil Faraday. On peut alors isoler le récipient, procéder à une nouvelle expérience et obtenir ainsi plusieurs litres d'acide carbonique liquide.

247. Chaleur de vaporisation. — Froid produit par l'évaporation. — Le passage de l'état liquide à l'état de vapeur donne lieu à un travail mécanique considérable qui résulte à la fois et de la désagrégation moléculaire du liquide, et de l'expansion du volume gazeux ; on doit donc s'attendre à ce qu'une quantité très-notable de chaleur disparaisse dans cette transformation. Ce résultat est pleinement confirmé par l'expérience. Toutes les fois, en effet, qu'un liquide s'évapore sans qu'on fasse intervenir l'action d'un foyer, on constate un abaissement de température. C'est ainsi, par exemple, que si on verse sur la main de l'alcool, et surtout de l'éther, on éprouve une sensation de froid très-marquée. L'eau produit un phénomène analogue, quoique moins prononcé, non pas que la chaleur qui disparaît dans son évaporation soit moindre que pour l'éther et l'alcool, — nous verrons plus loin, au contraire, qu'elle est plus considérable, — mais parce que les deux autres liquides sont plus volatils et se vaporisent plus vite. C'est

l'évaporation de l'eau qui explique la sensation de froid que l'on éprouve à la sortie du bain, alors que le corps est couvert d'une multitude de gouttelettes liquides. C'est aussi le principe de l'emploi des vases à rafraîchir que l'on appelle les *alcarazas*. Ce sont des vases en terre poreuse; l'eau que l'on place dans leur intérieur pénètre à travers leur substance, et vient former à la surface extérieure une mince pellicule qui s'évapore facilement en produisant un abaissement de température.

248. Expérience de Leslie. — On peut aisément congeler l'eau par le froid résultant de sa propre évaporation, à l'aide d'une expérience faite pour la première fois par Leslie. On se sert d'une petite capsule en cuivre très-mince, contenant une très-petite quantité d'eau; elle repose sur les bords d'un vase placé au-dessous et qui contient de l'acide sulfurique concentré. On place le tout sous le récipient de la machine pneumatique et on fait le vide. L'eau s'évapore activement, la vapeur d'eau est absorbée, à mesure qu'elle se forme, par l'acide sulfurique, et au bout de quelque temps on voit paraître la glace.

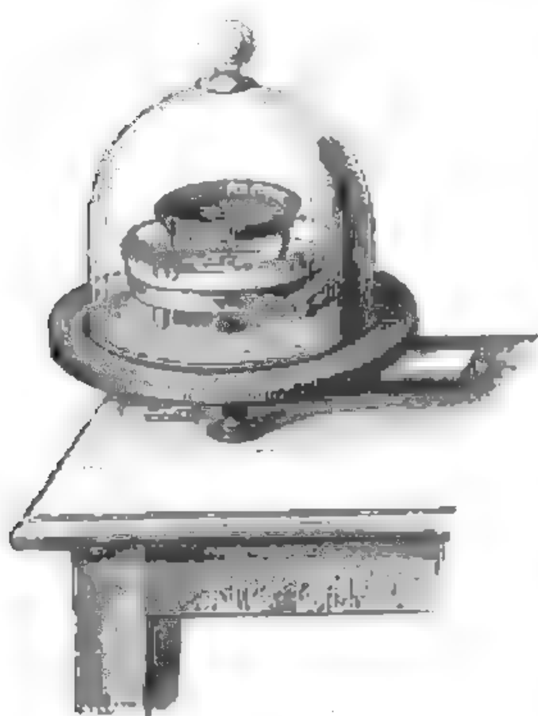


Fig. 238. — Expérience de Leslie.

L'expérience est en réalité un peu difficile et ne réussit pas toujours; cela tient à plusieurs causes.

D'une part, la vapeur d'eau qui occupe la partie supérieure de la cloche n'est qu'imparfaitement absorbée; d'autre part, à mesure que la couche superficielle de l'acide absorbe la vapeur d'eau, elle devient de moins en moins concentrée, et son affinité pour l'eau diminue rapidement.

M. Carré a construit un appareil dans lequel ces causes de lenteur de l'expérience sont écartées, et qui permet d'obtenir, en quelques instants, une masse de glace assez considérable.

Il se compose (fig. 239) d'un réservoir en plomb qui contient l'acide sulfurique. A l'une des extrémités s'élève un tube qui se recourbe deux fois, et à l'extrémité duquel on assujettit, à l'aide

d'un caoutchouc, une carafe contenant de l'eau. L'autre extrémité du réservoir est en communication avec une pompe pneumatique. Au levier de la pompe s'adapte une tige métallique qui met en

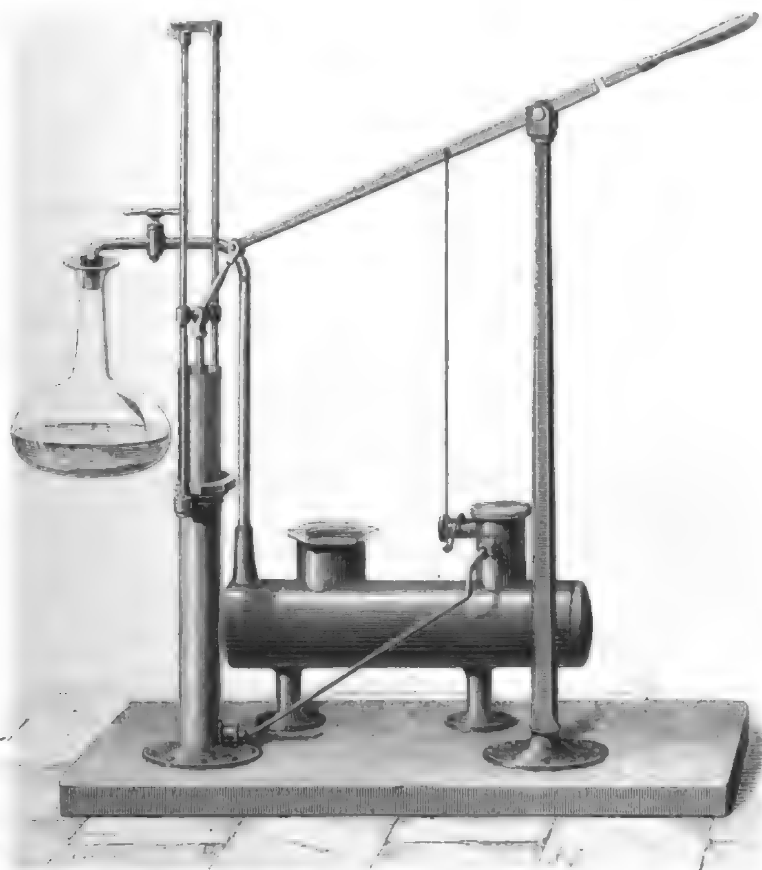


Fig. 239. — Appareil de M. Carré.

mouvement, pendant que celle-ci fonctionne, un agitateur placé dans l'acide. De cette façon la surface de celui-ci est continuellement renouvelée, l'absorption se fait régulièrement, et l'eau de la carafe est rapidement congelée.

249. Cryophore. — Le cryophore de Wollaston se compose d'un tube recourbé terminé par les deux boules A et B ; on a introduit de l'eau dans l'appareil et on a fermé à la lampe au mo-

ment où celle-ci était en ébullition, de cette façon l'air a été expulsé.

Quand on veut faire une expérience, on fait passer tout le liquide dans la boule B et on plonge la boule A dans un mélange réfrigérant, ou simplement dans de la glace. Le froid produit en A détermine la condensation de la vapeur, et par suite l'évaporation de l'eau en B. Aussi au bout de peu temps on voit apparaître des aiguilles de glace à la surface du liquide.

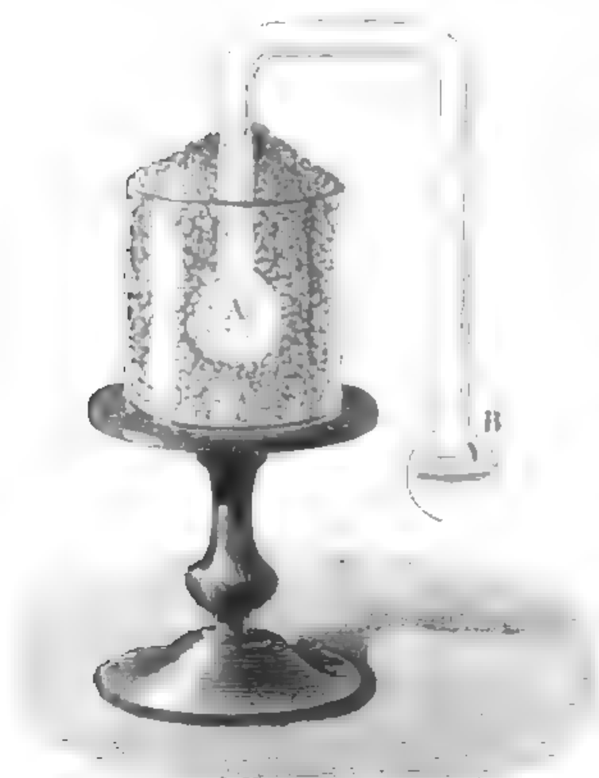


Fig. 240. — Cryophore.

250. Congélation de l'eau par la vaporisation de l'éther. — On met de l'eau dans un tube de verre plongeant dans l'éther que renferme un verre à expérience ; puis, à l'aide d'un soufflet, on dirige un courant d'air dans l'intérieur de la masse d'éther. L'évaporation se produit avec



Fig. 241. — Congélation de l'eau par l'évaporation de l'éther.

activité, et au bout de quelques minutes l'eau que renferme le tube est congelée.

Si, au lieu de provoquer l'évaporation de l'éther par un courant d'air, on plaçait le verre sous le récipient de la machine pneumatique et qu'on fît le vide, l'abaissement de température serait beaucoup plus marqué, et l'on arriverait très-facilement à congeler le mercure; mais cette expérience a l'inconvénient de détériorer plus ou moins gravement les machines, à cause de l'action dissolvante que l'éther exerce sur les corps gras des garnitures.

251. Congélation du mercure par l'acide sulfureux. — L'acide sulfureux liquide, beaucoup plus volatil que l'éther, permet de congeler le mercure. Afin de se mettre à l'abri de l'action suffocante du gaz, on opère de la manière suivante :

On place au fond d'un tube de verre d'abord du mercure et puis de l'acide sulfureux liquide. Le tube est fermé par un bouchon en caoutchouc muni de deux ouvertures; l'une donne passage à un tube qui plonge jusqu'au fond de l'acide sulfureux. Au moyen d'une vessie que l'on presse avec les mains, on fait passer un courant d'air dans le liquide. Le gaz s'échappe par un second tube et peut être dirigé à l'aide d'un caoutchouc au dehors de la pièce où se fait l'expérience. L'évaporation se fait rapidement, et au bout de peu de temps le mercure est congelé.

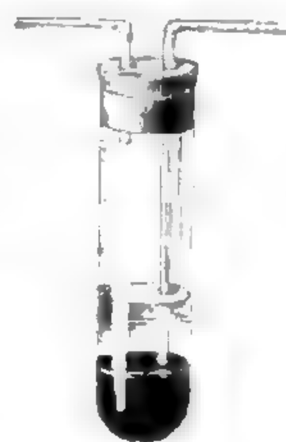
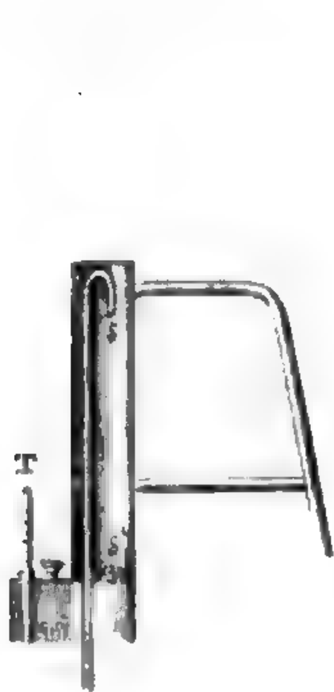


Fig. 242. Congélation du mercure par l'évaporation de l'acide sulfureux.

252. Appareil Carré. — L'appareil construit, il y a quelques années, par M. Carré, pour la fabrication de la glace, est aussi une application du froid produit par l'évaporation. Il se compose (fig. 243 et 244) de deux parties, une chaudière et un congélateur. La chaudière est en fer forgé et renferme, dans son intérieur, une série de plateaux superposés percés à leurs centres et à rebords, déversant leur trop plein les uns sur les autres; cette disposition a pour objet d'augmenter la surface de chauffe. La chaudière est remplie aux trois quarts d'une dissolution ammoniacale saturée, qui, comme on sait, renferme 6 à 700 fois son volume de gaz. Le congélateur a une forme annulaire, et il reçoit, dans l'espace vide central, un vase contenant l'eau à congeler. Il renferme entre ses parois une série de petits godets, qui ont également pour objet de multiplier les contacts du liquide avec les parties métalliques.

Dans la première phase de l'expérience qui est représentée sur notre figure, la chaudière est placée sur un fourneau jusqu'à ce que la température ait atteint 130°, et le congélateur est entouré d'eau froide. Le gaz ammoniac se dégage, se rend dans le ré-



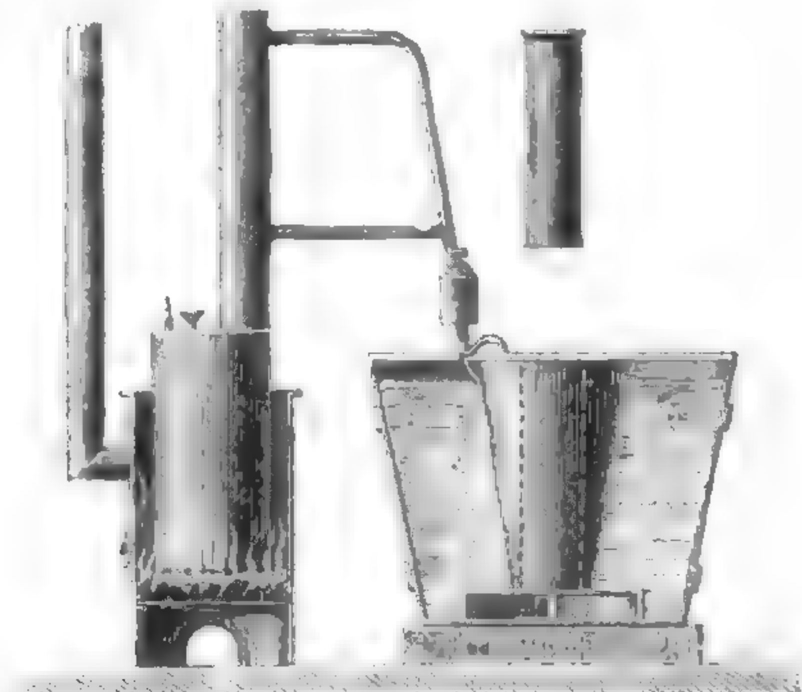


Fig. 243. Appareil Carré. Fig. 244.

frigérant par la soupape s' qui s'ouvre de bas en haut, et vient se condenser sur les divers godets dont nous avons parlé. Cette première partie de l'opération, pour les petits appareils destinés à l'économie domestique, dure environ trois quarts d'heure. Dans la seconde phase, on place dans l'espace central le vase cylindrique contenant l'eau à congeler; on entoure le réfrigérant d'une enveloppe en feutre très-peu conductrice de la chaleur, et on place la chaudière dans l'eau. Celle-ci, grâce au refroidissement, devient apte de nouveau à dissoudre le gaz qui revient dans la chaudière en ouvrant la soupape s du tube contourné appelé siphon; l'évaporation qui se produit alors dans le congélateur est extrêmement active, l'abaissement de température est très-considérable, et l'eau se congèle.

Pour pouvoir retirer le cylindre, il faut avoir la précaution d'introduire dans l'espace qui le reçoit une petite quantité d'un liquide qui ne puisse se congeler, tel que l'alcool ou une dissolution de chlorure de calcium, sans cela la vapeur se précipiterait et se congèlerait entre sa surface extérieure et les parois du réfrigérant, et il en résulterait une adhérence très-difficile à surmonter.

Le froid produit dans l'appareil Carré est extrêmement intense,

et on n'en utilise, on peut dire, qu'une très-petite partie, à cause de la très-faible conductibilité de l'eau. Les appareils industriels à production continue ne présentent pas, au moins au même degré, cet inconvénient.

253. Chaleur produite dans la condensation. — De même que l'évaporation consomme de la chaleur, le retour de la vapeur à l'état liquide doit en reproduire une quantité exactement égale.

Il y a, en effet, un travail produit par les forces extérieures et par les forces moléculaires, qui est l'équivalent exact de celui qui avait été produit par la chaleur au moment de l'évaporation. C'est sur cette révivification de la chaleur d'évaporation, au moment où la vapeur se condense, qu'est fondé le chauffage à la vapeur si généralement usité dans les usines. C'est aussi le principe de la mesure de la chaleur de vaporisation, et c'est ainsi que M. Regnault a montré, ainsi que nous le verrons plus loin, que cette chaleur à 100° est égale à 536 calories; c'est-à-dire que, pour faire passer un kilogramme d'eau à 100° à l'état de vapeur à la même température, il faut dépenser autant de chaleur que pour élever 536 kilogrammes d'eau de la température de zéro à celle de 1°.

CHAPITRE XXVI.

ÉBULLITION.

254. Ébullition. — Lorsqu'un liquide, contenu dans un vase ouvert, est soumis à l'action d'une température croissante, il se transforme graduellement en vapeur, qui se dissipe dans l'air ambiant. Cette évaporation n'a lieu d'abord qu'à la surface, mais il arrive un moment où des bulles de vapeur se forment dans les différents points du liquide, elles s'élèvent jusqu'à sa partie supérieure et impriment à toute la masse un mouvement plus ou moins tumultueux, accompagné d'un bruit caractéristique : c'est ce que l'on appelle *ébullition.*



Fig 245. — Ébullition.

Si l'on suit la marche progressive du phénomène dans un vase de verre contenant de l'eau, par exemple, on voit à un certain moment se dégager des bulles très-fines de gaz : ce sont des bulles d'air dissous. Un peu plus tard il se forme vers le fond, et en différents points des parois qui subissent directement l'action du foyer, des bulles plus grosses de vapeur qui s'élèvent en diminuant de volume et disparaissent avant d'avoir atteint la surface. Il se produit en ce moment un bruit particulier, pronostic de l'ébullition prochaine : on dit que le liquide *chante.* Ce

phénomène est dû à ce que les premières bulles de vapeur formées rencontrent, dans leur ascension, des couches plus froides où elles se condensent; l'eau envahit brusquement la place qu'elles occupent, en produisant une trépidation, une vibration toute spéciale qui donne lieu au phénomène sonore. Enfin les bulles deviennent plus nombreuses, elles grossissent au fur et à mesure qu'elles s'élèvent et viennent crever à la surface qu'elles soulèvent successivement; l'ébullition est alors en pleine activité.

255. Lois de l'ébullition. — 1° *A la pression ordinaire, l'ébullition se fait à une température constante et déterminée pour chaque liquide.*

Cette loi est analogue à celle de la fusion (225). Il en résulte que la température de l'ébullition est un coefficient *spécifique* propre à chaque liquide, et servant à définir sa nature.

Nous donnons ici le tableau de quelques températures d'ébullition.

TABLEAU

DU POINT D'ÉBULLITION DE QUELQUES LIQUIDES SOUS LA PRESSION DE 760mm.

Acide sulfureux	— 10°	Essence de térébenthine. .	+ 130°
Éther chlorhydrique . . .	+ 11°	Phosphore.	290°
Éther ordinaire	37°	Acide sulfurique concentré	325°
Alcool	79°	Mercure	353°
Eau distillée.	100°	Soufre	440°

2° *Pendant que le liquide bout, la température reste constante.*

Si dans le ballon de la figure 245 on introduit un thermomètre, on verra la température s'élever graduellement pendant les diverses phases qui précèdent l'ébullition; mais dès que celle-ci sera en pleine activité, on n'observera plus aucune variation. Cette observation conduit à la même conclusion que celle du froid produit par l'évaporation.

Puisque, malgré l'action continue du foyer, la température demeure constante, c'est que toute la chaleur produite est employée à effectuer le travail nécessaire pour la transformation du liquide en vapeur. On voit d'ailleurs, d'après cette circonstance, qu'à la

pression ordinaire l'eau ne peut s'échauffer dans un vase ouvert au-dessus de 100°. On explique ainsi qu'on puisse placer sur un foyer, même très-ardent, sans craindre de les fondre, des vases de fer-blanc, d'étain, ou de tout autre métal facilement fusible, pourvu qu'ils contiennent de l'eau. Celle-ci, en effet, ne peut pas atteindre une température supérieure à 100°, et l'équilibre s'établit entre elle et le métal, qui est toujours bon conducteur de la chaleur.

3° *Pendant qu'un liquide bout, la force élastique de la vapeur qu'il émet est égale à la pression extérieure.*

Cette importante proposition se démontre expérimentalement de la manière suivante :

On prend un tube recourbé A, ouvert à l'une de ses extrémités et fermé à l'autre. Du mercure remplit la petite branche, à l'exception d'un petit espace qui est occupé par de l'eau; dans la grande branche il s'élève un peu au-dessus de la courbure. D'autre part, on fait bouillir de l'eau dans un vase, et pendant que l'ébullition a lieu, on plonge dans la vapeur le tube recourbé. On voit alors l'eau qui occupe l'espace supérieur se réduire en vapeur, le mercure descendre, et bientôt le niveau devient le même dans les deux branches. Donc la pression que l'atmosphère exerce à l'extrémité ouverte du tube est exactement équilibrée par la pression égale de la vapeur formée par l'eau, laquelle est à la température de son ébullition.

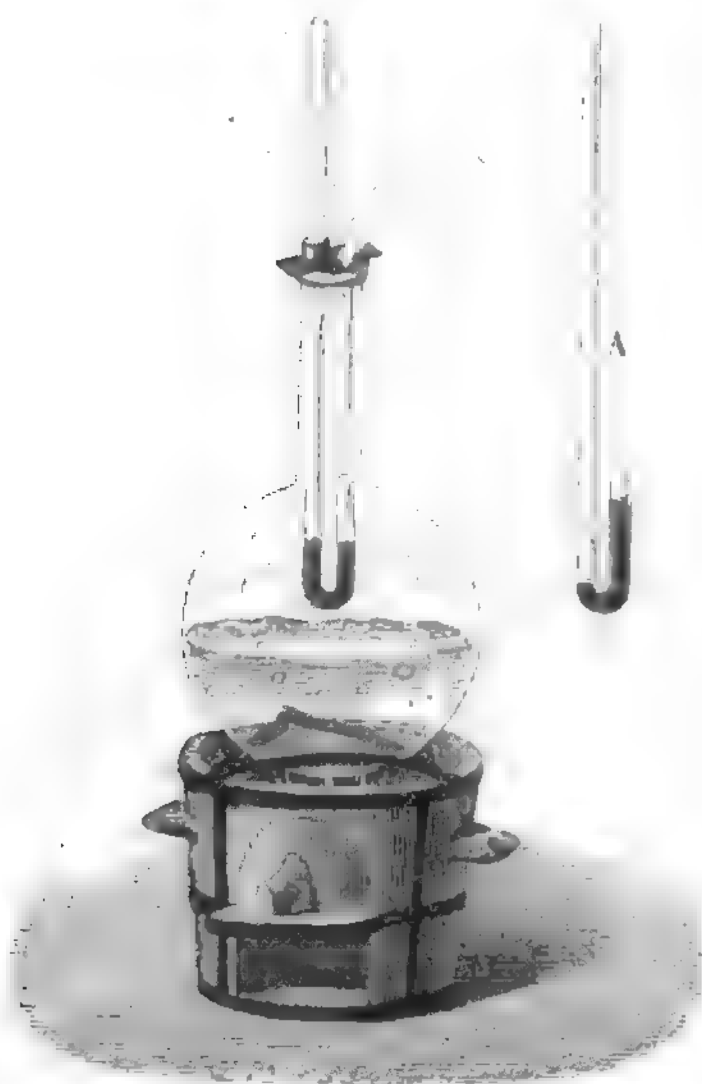


Fig. 246. — Tension de la vapeur au moment de l'ébullition.

Pour que l'expérience réussisse, il faut que la quantité d'eau qui se trouve dans le tube soit un peu plus grande que celle qui est nécessaire à la saturation de l'espace correspondant à l'égalité des

niveaux. Sans cela cet espace ne serait point saturé et la tension se trouverait inférieure à la tension maxima propre à la température de l'ébullition.

256. Théorie de l'ébullition. — La circonstance qui vient d'être mentionnée donne la vraie définition physique de l'ébullition. *Un liquide est en ébullition lorsqu'il émet de la vapeur ayant la même tension que celle de l'atmosphère qui est au-dessus de lui.* On peut *à priori* se rendre compte de la rigoureuse exactitude de cette proposition. Considérons, en effet, un liquide contenu dans un vase (fig. 247); quelle que soit la température, et par conséquent la tension de la vapeur qui tend à se former, l'évaporation se produira toujours à la surface; car les gaz, ainsi que cela a été expliqué (chap. XIV), se pénètrent toujours mutuellement et d'une manière intime. La pression extérieure ne pourrait tout au plus que ralentir cette diffusion, qui est d'ailleurs inévitable. Mais il en est tout autrement dans l'intérieur du liquide. Là une bulle de vapeur *m* ne saurait se former qu'autant que sa force élastique est capable de surmonter, et la pression atmosphérique qui se transmet dans l'état actuel par l'intermédiaire du liquide lui-même, et le poids de la colonne liquide qui s'élève au-dessus d'elle. Si la température a atteint le degré nécessaire pour qu'il en soit ainsi, la bulle se forme et s'élève en vertu de sa légèreté spécifique. Mais à mesure qu'elle se rapproche de la surface, la hauteur du liquide au-dessus d'elle diminue, elle se trouve donc moins pressée et sa force élastique se modifie de manière à être toujours en équilibre avec les forces qui agissent sur elle; si bien que lorsqu'elle arrive à la surface, sa pression est exactement égale à celle de l'atmosphère.



Fig. 247.

La température d'ébullition est donc nécessairement déterminée, puisque c'est celle qui correspond à une tension de vapeur égale à celle de l'atmosphère. Il convient de remarquer toutefois que cette température varie dans les diverses couches du liquide, et qu'elle est d'autant plus considérable qu'il s'agit de couches plus profondes. Aussi, dans la détermination du second point fixe du thermomètre, avons-nous dit qu'il faut plonger l'instrument dans

la vapeur et non dans le liquide. Il faudrait opérer d'une manière analogue pour déterminer avec quelque précision la température d'ébullition d'un liquide. Ordinairement les chimistes procèdent plus simplement, ils se contentent de chauffer le liquide dans une cornue tubulée, par la tubulure de laquelle passe un thermomètre plongeant dans les parties supérieures du liquide. On conçoit dès lors que, suivant le plus ou moins d'immersion de l'instrument, on obtienne une température plus ou moins élevée.

257. Influence de la pression sur la température du point d'ébullition. — Il résulte évidemment de ce qui précède que la température d'ébullition d'un liquide doit varier avec la pression qui s'exerce sur la surface. L'eau, par exemple, bout à 100° sous la pression extérieure de 760 millimètres; mais si la pression devient plus faible, l'ébullition pourra se produire à une température plus basse. Sous le récipient de la machine pneumatique on peut faire bouillir à une température quelconque. Dans l'expérience de M. Carré (248) on voit l'eau de la carafe entrer en pleine ébullition quelques instants avant l'apparition de la glace. Le mot d'*eau bouillante* ne correspond donc dans notre esprit à une sensation déterminée de chaleur que parce qu'on n'a l'occasion d'observer le phénomène qu'à des pressions qui diffèrent toujours fort peu de la pression moyenne de 760 millimètres.

Ainsi, à Paris, les pressions extérieures varient entre les limites extrêmes de 720 à 790 millimètres, et la température d'ébullition, par conséquent, de 98°,5 à 101°,1. Cette différence de 3° environ ne joue qu'un rôle insignifiant dans les applications, mais elle est très-considérable à beaucoup d'égards et on doit en tenir soigneusement compte. Ainsi, par exemple, dans la détermination du point 100 du thermomètre, supposons que la pression extérieure soit de 730,5. En consultant les tables de la tension maxima de la vapeur d'eau on trouve que cette tension correspond à la température de 98°,9; le point où s'arrête le mercure, représente donc, non la température de 100°, mais bien celle de 98°,9. Pour trouver le point où doit être inscrite la température 100° qui doit toujours être en évidence dans l'échelle, on mesure la longueur l qui sépare du zéro le point déterminé expérimentale-

ment, et en désignant par x celle qui correspond à 100°, on a évidemment la relation $\frac{x}{l} = \frac{100}{98,5}$, d'où $x = l\frac{100}{98,5}$.

258. Expérience de Franklin. — On met en évidence l'ébullition de l'eau à une température inférieure à 100° par l'expérience suivante :

On fait bouillir de l'eau dans un ballon pendant assez longtemps, pour que l'air soit expulsé au moins en très-grande partie; on retire le ballon du feu, on le bouche, et, afin de rendre la fermeture plus hermétique, et empêcher l'introduction de l'air, on le renverse dans un vase contenant lui-même de l'eau bouillie.

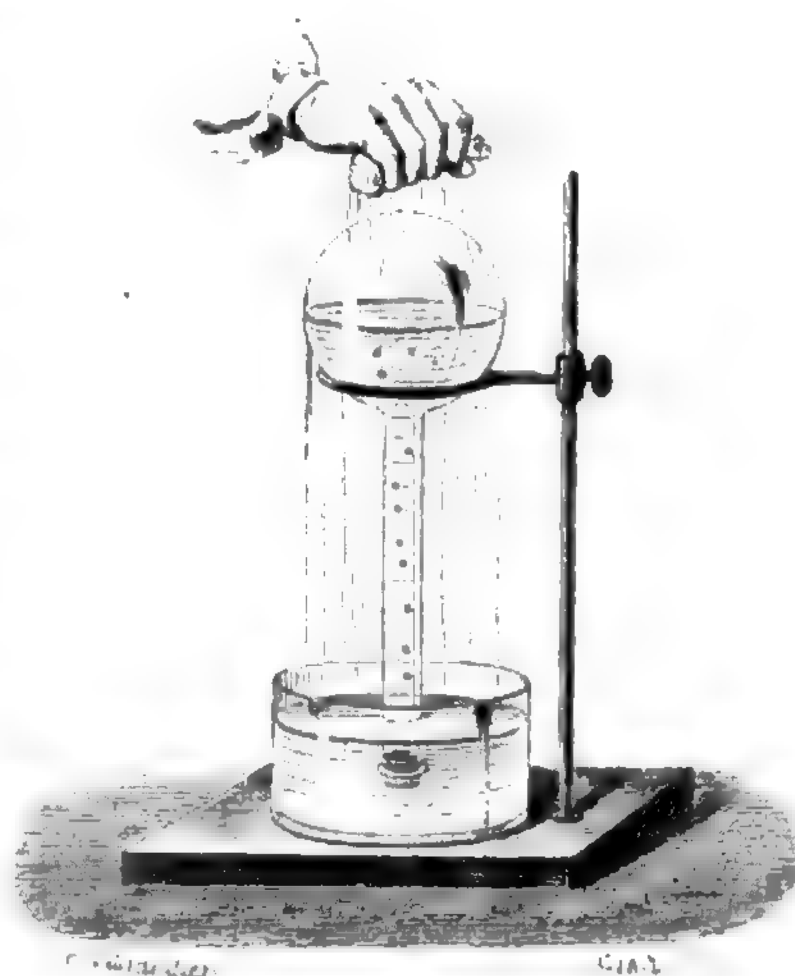


Fig. 248. — Expérience de Franklin.

L'ébullition s'arrête au bout de peu d'instants par suite du refroidissement du liquide. Si alors on verse de l'eau froide sur le ballon, mieux encore si on applique sur sa surface de la glace, l'ébullition recommence et peut se prolonger pendant un temps assez long. Ce fait s'explique aisément : le contact de l'eau froide ou de la glace diminue la température de la vapeur qui presse la surface liquide, sa force élastique diminue également et d'une façon très-notable, comme nous le verrons plus loin, et c'est grâce à cette diminution de pression que l'ébullition recommence.

259. Appareil de Derosne et Cail. — On utilise souvent dans les raffineries de sucre le principe de cette expérience, pour évaporer les sirops à une température plus basse que celle qui serait nécessaire en opérant à l'air libre. On a de cette façon l'avantage de ménager le combustible; mais ce n'est pas le seul. Lorsqu'on chauffe les sirops, il y a toujours une portion du sucre qui, par l'action de la chaleur, perd sa propriété de cristalliser, et reste, par

conséquent, comme résidu dans les *mélasses*. Or on a observé que plus la température est élevée, plus est considérable la quantité de sucre qui subit cette fâcheuse transformation.

L'appareil employé est dû à MM. Derosne et Cail. Il se compose

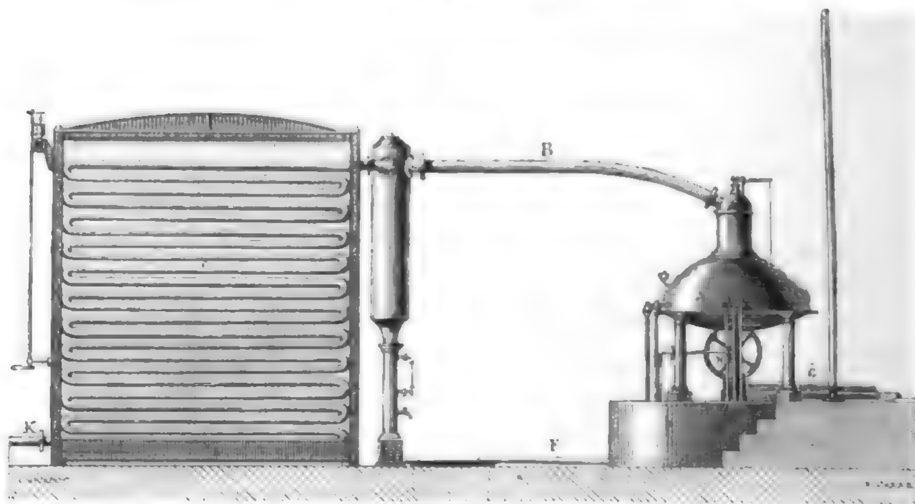


Fig. 249. — Appareil de Derosne et Cail.

d'une chaudière A renfermant le sirop à évaporer. La vapeur produite est amenée par le tuyau B dans un immense serpentin en cuivre, sur lequel coule du sirop froid, que l'on amène du réservoir supérieur D. Ce sirop en coulant sur le serpentin abaisse la température de la vapeur, ce qui facilite l'ébullition; mais d'ailleurs il s'échauffe lui-même et arrive ainsi en partie concentré dans le réservoir E, d'où il sera ultérieurement amené dans la chaudière par le tuyau F.

L'extrémité K du serpentin peut être mise en communication avec une pompe pneumatique qui enlève à la fois l'air et la vapeur, et maintient ainsi, aussi bas que possible, la température d'ébullition. Aujourd'hui, grâce aux progrès de la construction des machines pneumatiques, on peut les mettre en rapport direct avec la chaudière, et supprimer ainsi la portion de l'appareil qui forme le serpentin.

260. Hypsomètre. — De même que la connaissance de la pression extérieure permet d'assigner exactement la température

d'ébullition de l'eau, réciproquement, si l'on connaît la température d'ébullition de l'eau on pourra en déduire la pression extérieure, car ce n'est autre chose que la pression maxima correspondant à cette température. Si, par exemple, on reconnaît que l'eau bout à 99°, on cherche dans les tables la tension maxima de la vapeur d'eau correspondante à 99°; on trouve 733^{mm},2; c'est précisément la pression extérieure.



Fig. 250. — Hypsomètre.

Le baromètre étant au fond un instrument peu transportable, Wollaston avait proposé de remplacer l'observation du baromètre par celle de l'ébullition de l'eau. Il employait pour cet objet un thermomètre à gros réservoir, et dont le mercure ne s'étendait sur la tige que pour les températures voisines de 100°, telles qu'on pouvait les observer en faisant bouillir de l'eau à diverses altitudes. Cet instrument avait reçu de son auteur le nom de *thermomètre barométrique*.

M. Regnault a fait construire, sous le nom d'*hypsomètre*, un petit appareil analogue. Il se compose d'une petite chaudière contenant de l'eau chauffée par une lampe à alcool, et surmontée d'un tube à tirages par la partie supérieure duquel s'échappe la vapeur. Un thermomètre plongé dans la vapeur, et dont l'extrémité sort à peine de la partie supérieure du tube, donne la température de l'ébullition. De cette température on déduit la pression extérieure, et de là, à l'aide de la formule de Laplace, l'altitude du lieu dans lequel se fait l'expérience.

Quand on veut se contenter de résultats approchés, on peut admettre que l'altitude est sensiblement proportionnelle à la différence qui existe entre la température d'ébullition et 100°. On se sert alors de la formule indiquée par M. Soret :

$$h = 295^{m} \, (100° - t)$$

Ainsi, par exemple, à Quito l'eau bout à 90°,1, l'altitude serait

donc $9,9 \times 295 = 2920^m$, nombre très-approché de la véritable altitude égale à 2908 mètres.

A Madrid, à la pression moyenne, la température d'ébullition est de 97°,8, ce qui donne pour l'altitude $2,2 \times 295 = 649^m$; l'altitude réelle est de 610 mètres.

261. Marmite de Papin. — Si la diminution de la pression abaisse la température du point d'ébullition, inversement, lorsque la pression s'élève, la température d'ébullition s'élève aussi. On peut donc, en faisant communiquer la chaudière avec un réservoir contenant de l'air à plusieurs atmosphères de pression, élever la température de l'ébullition jusqu'à 110, 115 ou 120°, résultat fort utile dans quelques opérations industrielles. Mais pour que l'ébullition puisse, à proprement parler, se produire, il faut que l'espace situé au-dessus du liquide soit assez considérable, et ne soit pas d'ailleurs soumis à la température de la chaudière. S'il en était autrement, si, par exemple, on chauffait de l'eau dans un vase hermétiquement fermé, la vapeur, s'accumulant au-dessus du liquide, accroîtrait indéfiniment la pression, et par suite le point d'ébullition serait indéfiniment retardé, en d'autres termes, l'ébullition n'aurait pas lieu. C'est ce qui arrive dans l'appareil dont l'invention est due au célèbre Papin et qui porte le nom de *marmite de Papin*. C'est un vase de bronze à parois très-résistantes, dont la partie supérieure est fermée par un couvercle fortement pressé à l'aide d'une vis. La température de l'eau placée dans cet appareil s'élève indéfiniment, si l'on entretient un foyer au-dessous du vase. On peut ainsi exécuter des opérations qui n'eussent point

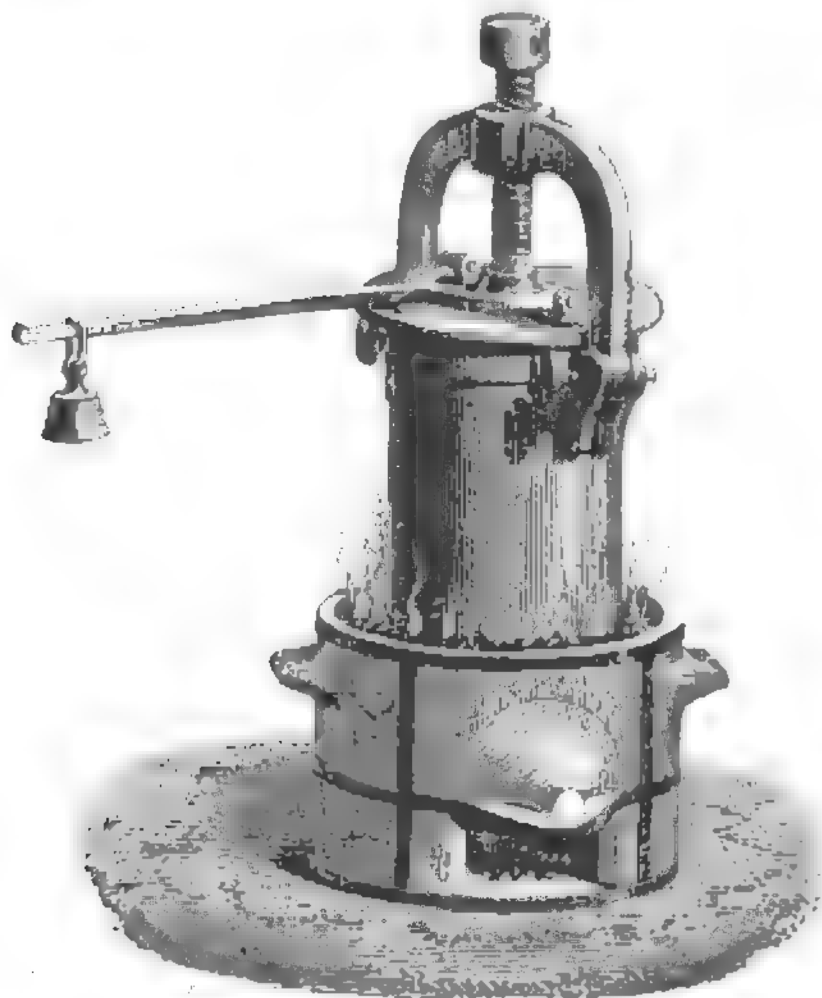


Fig. 251. — Marmite de Papin.

été possibles avec de l'eau à 100°, par exemple, dissoudre la gélatine contenue dans les os. C'est en vue d'applications de ce genre que Papin avait construit son appareil, auquel il avait donné le nom de *digesteur*.

Il faut remarquer qu'à mesure que la température s'élève, la force élastique de la vapeur croît très-rapidement et peut acquérir une puissance énorme. Ainsi, à 200°, la pression est déjà de 16 atmosphères, c'est-à-dire de 1600 kilogrammes par décimètre carré environ. Sous l'action de telles forces, des vases, même très-résistants, peuvent éclater et donner lieu aux plus redoutables accidents. Pour prévenir ce résultat, Papin imagina un organe qui est devenu usuel dans les chaudières à vapeur : c'est la soupape de sûreté. Elle est formée d'une ouverture pratiquée dans le couvercle de la marmite; cette ouverture se ferme par un levier que l'on charge à l'aide d'un poids. Supposons que l'ouverture ait 1 centimètre carré de surface et que l'on ne veuille pas dépasser la pression de 10 atmosphères, qui correspond à la température de 180°. On disposera de la grandeur du poids et de sa position pour que la pression exercée sur l'ouverture soit de 10 kilogrammes. Si la force élastique de la vapeur surpasse 10 atmosphères, le levier sera soulevé, la vapeur s'échappera et tout danger d'explosion sera prévenu.

Lorsque la force élastique de la vapeur que contient la marmite est devenue très-considérable, et qu'on lui donne issue en soulevant le levier, elle s'échappe bruyamment en produisant un nuage dans l'atmosphère. Si l'on plonge la main dans ce nuage, on éprouve à peine une sensation de chaleur, tandis que si l'on faisait la même expérience avec de la vapeur sortant d'un vase contenant de l'eau bouillante sous la pression ordinaire, la main serait inévitablement brûlée. Ce résultat, singulier en apparence, est parfaitement d'accord avec les principes déjà indiqués plusieurs fois. La vapeur formée à 100° sous la pression extérieure conserve naturellement à l'air et sa pression et sa température, qui est capable de désorganiser nos tissus. Au contraire, la vapeur qui se trouve dans la marmite de Papin a une pression très-supérieure à celle de l'atmosphère, et par suite elle se dilate fortement à sa

sortie en refoulant l'air extérieur. Cette action mécanique est accompagnée de la disparition d'une notable quantité de chaleur, et par suite la température du jet se trouve considérablement abaissée.

C'est par un phénomène du même genre qu'on peut, en dirigeant sur la main l'air expiré des poumons, produire à volonté une sensation de chaleur ou de froid. Si la bouche est largement ouverte, l'air mêlé de vapeur qui sort possède la température du poumon, qui est d'environ 37°. Mais si on ferme la bouche en comprimant la masse gazeuse, celle-ci se dilate à sa sortie, sa température s'abaisse et elle produit une sensation de froid.

262. Température d'ébullition des dissolutions salines. — Lorsque l'eau tient en dissolution des matières salines, la température d'ébullition s'élève et d'autant plus que la proportion du sel est plus considérable. Ainsi, avec du sel marin, on peut graduellement élever la température de l'eau bouillante de 100 à 108°.

Lorsque la dissolution n'est pas saturée, le point d'ébullition n'est pas constant, il s'élève graduellement à mesure que le liquide se concentre; mais il arrive un moment où le sel commence à se déposer, et la température devient alors invariable : c'est elle qu'il faut prendre pour la température d'ébullition de la solution saturée. Cela est d'autant plus important qu'il se produit quelquefois un phénomène analogue à la sursaturation ; la température s'élève graduellement sans que le solide se dépose, puis, à un certain moment, ce dépôt commence à se produire brusquement et l'on voit le thermomètre descendre de plusieurs degrés.

Il est très-important de remarquer que quelle que soit la température de la dissolution, celle de la vapeur ne dépend que de la pression extérieure et reste la même que dans le cas de l'eau pure. Ce résultat est facile à concevoir *à priori,* car la vapeur qui se dégage étant de la vapeur d'eau pure et se trouvant évidemment en équilibre de pression avec l'atmosphère au moment où elle se dégage, doit nécessairement avoir la température correspondante à cette pression. Toutefois, tant que la vapeur n'a pas quitté le liquide, il est difficile de comprendre qu'elle ne soit pas en équilibre de température avec lui ; il est donc probable qu'au moment où elle quitte la surface, elle éprouve un refroidissement brusque.

C'est un point sur lequel on peut utilement faire de nouvelles recherches.

Nous empruntons à un travail important de M. Legrand sur ce sujet le tableau suivant, qui donne la température d'ébullition de quelques solutions saturées.

TABLEAU

DU POINT D'ÉBULLITION DE QUELQUES DISSOLUTIONS SALINES SATURÉES.

DISSOLUTIONS.	TEMPÉRATURE du POINT D'ÉBULLITION.	PROPORTION de sel dissous DANS 100 PARTIES D'EAU.
Chlorate de potasse. . . .	104°,2	61,5
Chlorure de baryum. . . .	104, 4	60,1
Carbonate de soude.	104, 6	48,5
Phosphate de soude.	106, 5	113,2
Chlorure de potassium . . .	108, 3	59,4
Chlorure de sodium.	108, 4	41,2
Chlorure d'ammonium. . . .	114, 2	88,9
Tartrate neutre de potasse. .	114, 6	296,2
Nitrate de potasse	115, 9	335,1
Chlorure de strontium. . . .	117, 9	117,5
Nitrate de soude.	121, 0	224,8
Acétate de soude.	124, 3	209,0
Carbonate de potasse	135, 0	205,0
Nitrate de chaux.	151, 0	362,2
Acétate de potasse	169, 0	798,2
Chlorure de calcium	179, 5	325,6

263. Influence de l'air dissous sur l'ébullition. — La présence de l'air au sein de la masse liquide est une condition nécessaire pour la régularité de l'ébullition et sa production à la température normale; on le prouve par des expériences diverses et très-démonstratives.

1° *Expérience de M. Donny.* — On prend un tube de verre recourbé deux fois et terminé, à une de ses extrémités, par une série de renflements. On commence par le laver soigneusement

avec de l'alcool, de l'éther, et finalement on y laisse séjourner de l'acide sulfurique affaibli. Ces opérations ont pour résultat de dissoudre ou de détruire les particules solides adhérentes aux parois et sur lesquelles l'air atmosphérique se fixe toujours avec une certaine persistance. On introduit ensuite de l'eau que l'on fait bouillir

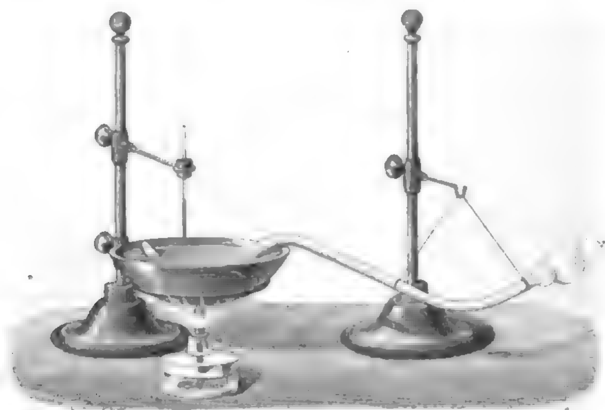


Fig. 252. — Expérience de M. Donny.

pendant longtemps pour en expulser l'air dissous, et pendant que l'ébullition a lieu, on ferme à la lampe l'extrémité effilée de l'appareil. Cela posé, on plonge l'autre extrémité où l'on fait arriver toute l'eau dans une dissolution de chlorure de calcium, et on reconnaît qu'on peut élever la température jusqu'à 135° sans qu'aucune ébullition se manifeste. Vers cette température, on voit quelques bulles de vapeur se former et la masse de liquide est projetée en entier avec une grande violence; les boules qui terminent le tube sont précisément destinées à atténuer les effets de cette projection.

2° *Expérience de M. L. Dufour.* — Cette expérience est encore plus décisive. On commence par mélanger de l'huile de lin dont la densité est 0,93 avec de l'essence de girofle de densité 1,01, de façon que vers les températures voisines de 100° le mélange ait une densité égale à celle de l'eau. On introduit ce mélange dans une boîte cubique en tôle, percée de deux ouvertures opposées, munies de glaces, de manière à permettre de voir ce qui se passe dans l'intérieur. La boîte est placée dans une enveloppe métallique qui

permet de l'échauffer pour ainsi dire latéralement. Quand la température a atteint 120°, on laisse tomber dans le mélange une grosse goutte d'eau, qui vient d'abord toucher le fond de la boîte, s'y vaporise en partie et se divise en un certain nombre de gouttelettes plus fines, dont quelques-unes viennent se placer entre les deux fenêtres de façon à pouvoir être aperçues par l'observateur. L'expérience ainsi préparée, on peut élever la température jusqu'à 140, 150 et même 180° sans que quelques-unes des gouttelettes se vaporisent. Or, à 180°, la tension maxima de la vapeur d'eau est de 10 atmosphères, et il est à coup sûr singulier de voir une goutte d'eau qui ne reçoit d'autre pression que la pression extérieure rester liquide dans ces conditions. C'est qu'il manque à la vaporisation une condition indispensable : la présence de l'air. Si, en effet, on vient à toucher les gouttes avec une tige très-fine en métal, mieux encore avec une tige de bois, elles se vaporisent immédiatement avec une grande violence et en faisant entendre un sifflement particulier. C'est que les tiges dont on se sert contiennent toujours une certaine quantité d'air condensé à leur surface et c'est grâce à lui que la vaporisation peut se produire. L'exactitude de cette explication est confirmée par ce fait, que lorsque les tiges ont servi un certain nombre de fois, elles deviennent inactives et ne peuvent plus provoquer l'ébullition, parce que l'air qui était adhérent sur leur surface a été épuisé.

3° *Production de l'ébullition par la formation de bulles de gaz au sein du liquide.* — M. Dufour s'est servi, pour démontrer cette proposition, d'une cornue lavée avec soin à l'acide sulfurique et dans laquelle il a placé de l'eau légèrement acidulée, dont on expulse l'air par plusieurs ébullitions répétées. La cornue communique d'une part avec un manomètre, et de l'autre avec une machine pneumatique. On raréfie l'air, je suppose, jusqu'à ce que la pression soit de 150 millimètres seulement, ce qui correspond à une température d'ébullition de 60°. M. Dufour a reconnu que dans ces conditions on peut chauffer graduellement jusqu'à 75° sans que l'ébullition se produise. Si alors, à l'aide de deux fils de platine disposés à cet effet, on produit un courant dans la masse liquide, l'oxygène et l'hydrogène provenant de la décomposition de

l'eau se dégagent et aussitôt l'ébullition se produit avec une grande violence; une partie du liquide est projetée, comme dans l'expérience de M. Donny.

On doit conclure des expériences précédentes que l'air joue un rôle essentiel dans l'ébullition, qu'il constitue comme une sorte de surface d'évaporation à l'intérieur du liquide, et que cette surface est d'ailleurs indispensable à la production du phénomène. Cette conclusion n'a rien que d'admissible *à priori.* Les forces attractives moléculaires varient très-rapidement avec la distance, elles peuvent donc constituer, lorsque le liquide est privé d'air, un obstacle invincible à la production de la vapeur. Mais dès qu'une surface gazeuse se produit dans le liquide, la force attractive est énormément diminuée, du moins d'un certain côté du liquide; celui-ci peut donc obéir à la force expansive produite par la chaleur et se vaporiser. Il est permis de penser d'après cela que, si l'on pouvait *rigoureusement* priver d'air une masse liquide, le phénomène de l'ébullition serait absolument impossible; mais on ne peut jamais, quoi qu'on fasse, arriver à expulser les dernières particules de l'air dissous.

Les observations précédentes expliquent le retard qu'éprouve l'ébullition de l'eau dans les vases de verre soigneusement lavés et la formation caractéristique de grosses bulles de vapeur qui donnent lieu à des soubresauts très-prononcés; c'est un fait connu depuis fort longtemps. Le phénomène est bien plus prononcé avec l'acide sulfurique; si on fait bouillir ce liquide dans un vase de verre, il se forme au contact des parois d'énormes bulles qui, à raison de la viscosité du liquide, en soulèvent la masse et la laissent ensuite retomber. Ces violents soubresauts peuvent amener la rupture du vase. On évite cet inconvénient en se servant d'une grille circulaire (fig. 252) à l'aide de laquelle on chauffe seulement la partie supérieure du liquide.

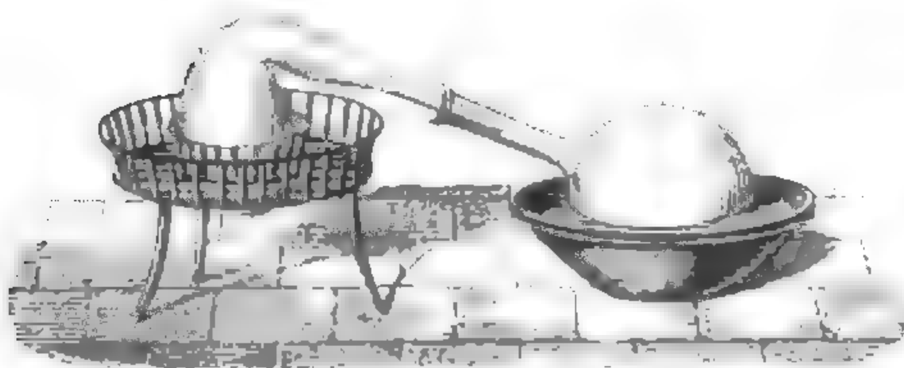


Fig. 253. — Ébullition de l'acide sulfurique.

L'ébullition de l'éther et de l'alcool présente quelques particularités analogues, bien que ces liquides soient très-peu visqueux; mais ils dissolvent les matières grasses de la surface du verre, mouillent par suite complétement les parois et y adhèrent très-fortement.

264. Caléfaction. — La caléfaction constitue un mode de vaporisation qui, sans être essentiellement différent de ceux qui viennent d'être décrits, présente toutefois des particularités curieuses et intéressantes.

Si l'on prend une plaque d'argent ou de fer bien lisse et qu'on verse sur elle une goutte d'eau, celle-ci s'étale sur la plaque et s'y évapore d'autant plus vite que la température est plus élevée. Toutefois cela n'a lieu que dans une certaine mesure. Lorsque la température de la plaque dépasse une certaine limite, qui pour l'eau paraît être de 150° environ, on voit la goutte d'eau se former en un globule qui tourne sans cesse sur lui-même, se plisse, comme le montre la figure, en présentant toujours des contours arrondis, et s'évapore avec une *certaine lenteur*. Cette dernière circonstance est importante et on la vérifie aisément par l'expérience. Qu'on cesse de chauffer la plaque, celle-ci se refroidit et il arrive un instant où le globule s'aplatit, l'ébullition se manifeste et le liquide s'évapore et disparaît rapidement en faisant entendre un bruissement plus ou moins intense.



Fig. 254. — Globule de liquide pendant la caléfaction.

Ces phénomènes sont très-anciennement connus, ils ont été étudiés autrefois par Leidenfrost et plus tard par Klaproth. Plus récemment, M. Boutigny en a fait l'objet de recherches nouvelles très-détaillées; c'est à lui qu'est dû le mot de *caléfaction* qui sert à les exprimer. Il désigne aussi sous le nom d'*état sphéroïdal* la forme globulaire qu'affectent les liquides dans leur contact avec des surfaces métalliques suffisamment chaudes.

La caléfaction peut se produire avec des liquides quelconques, même très-volatils, tels que l'alcool et l'éther. On peut se servir de l'acide sulfureux liquide, qui bout à — 10°, du protoxyde d'azote liquéfié, dont la température d'ébullition est de 70° au-dessous de zéro.

On constate que pendant la caléfaction le liquide ne bout pas. De temps en temps, il est vrai, on voit se former dans la masse quelques bulles de vapeur qui viennent crever à la partie supérieure du globule; mais cela est dû à quelque aspérité de la plaque qui soulève la surface inférieure, de sorte que la vapeur ne peut plus s'échapper qu'à travers la masse. Lorsque la surface du métal est parfaitement lisse et unie, on n'observe aucune bulle.

Si, à l'aide d'un thermomètre à très-petit réservoir ou d'une petite sonde thermo-électrique, on mesure la température du liquide, on reconnaît qu'elle est toujours un peu inférieure à celle de son ébullition.

265. Congélation de l'eau et du mercure à l'aide de la caléfaction. — Si l'on fait rougir un creuset d'argent ou de platine à l'aide d'une forte lampe, et qu'on verse dans son intérieur de l'acide sulfureux liquide, celui-ci prend l'état sphéroïdal et se maintient à une température inférieure à — 10°. Pour rendre sensible ce fait, on verse sur la masse globulaire une certaine quantité d'eau qui se congèle instantanément.

On fait dans les cours l'expérience avec du protoxyde d'azote; on verse dans ce cas du mercure, qui se trouve instantanément solidifié par son contact avec le liquide.

Ce mode d'expérimentation est dû à M. Boutigny, qui a beaucoup insisté sur la contradiction que paraissent présenter ces phénomènes avec la loi de l'équilibre de température. Cette contradiction est réelle; mais elle est de même nature que celle que l'on observe quand on place un vase contenant de l'eau au-dessus d'un foyer si ardent qu'il soit ; la température se maintient, comme nous l'avons vu, à 100°, la chaleur du foyer étant exclusivement employée à produire la vaporisation. C'est aussi ce qui a lieu dans les phénomènes de caléfaction, ainsi que nous allons l'expliquer.

266. Il n'y a pas de contact entre le globule et la surface

métallique. — Le point fondamental de la théorie de la caléfaction est l'absence de contact entre le liquide à l'état sphéroïdal et la surface métallique. On démontre ce fait par une expérience aussi simple que rigoureuse.

On se sert d'une plaque bien plane et que l'on dispose d'une façon parfaitement horizontale sur son support; ce résultat peut être obtenu par le jeu de vis calantes. On fait chauffer la plaque et on verse sur elle quelques gouttes d'eau qui prennent l'état sphé-

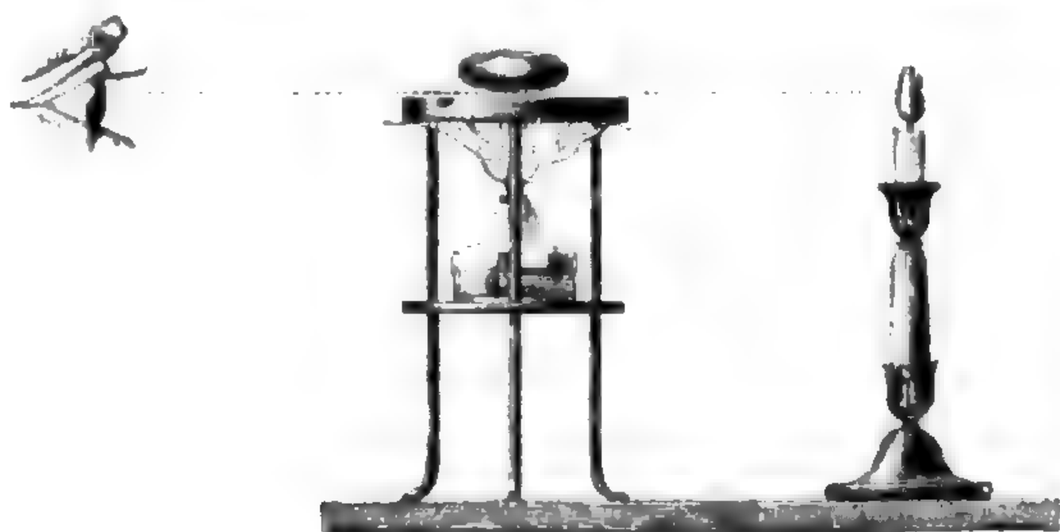


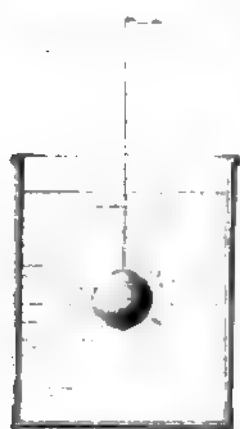
Fig. 255.

roïdal. A l'aide d'un fil de platine qui pénètre dans le globule, on maintient celui-ci vers le centre de la plaque. Il est très-facile alors, en plaçant une lumière d'un côté du globule, et regardant de l'autre, d'apercevoir distinctement l'espace qui sépare le globule de la plaque. L'expérience peut être fort aisément projetée avec la lumière solaire ou la lumière électrique.

Il résulte de cette sorte d'isolement du globule qu'il se produit sur toute sa surface une évaporation active qui empêche la température de s'élever jusqu'au point d'ébullition. Au moment où cesse le contact, la formation de la vapeur devient moins intense qu'avant, puisque la chaleur de la plaque ne se communique plus que par rayonnement. Mais, contrairement à ce qu'avait cru Klaproth, à partir de ce moment la vaporisation est d'autant plus rapide que la température de la plaque est plus élevée.

L'absence de contact entre un liquide et un métal ou tout autre corps chauffé à une température élevée est rendue manifeste par diverses expériences. Si, par exemple, on chauffe au rouge vif une boule de platine et qu'on la plonge (fig. 256) dans de l'eau à la tem-

pérature ordinaire, on voit le liquide se déprimer et former comme une sorte de gaîne autour de la boule. Celle-ci reste rouge pendant quelques instants, et ce n'est que lorsque la température s'est abaissée jusqu'à 150° environ que le contact a lieu. Une ébullition très-vive s'établit alors dans le liquide et il se dégage d'abondantes vapeurs.


Fig. 256.

Si au-dessus de l'eau on fait fondre du sucre et qu'on le fasse couler en gouttes sur le liquide, ces gouttes flottent quelques instants, bien que leur densité soit plus grande que celle de l'eau (79); mais bientôt le contact a lieu, le globule se brise et se précipite dans l'eau, où il se dissout.

C'est un phénomène tout à fait analogue qui a lieu lorsqu'on met un fragment de potassium sur l'eau. L'eau est décomposée, son hydrogène se dégage et brûle avec une flamme rouge; quant à l'oxygène, il se combine avec le potassium pour former de la potasse; le globule de potasse flotte sur l'eau sans être touché par elle à cause de la température élevée à laquelle il se trouve. Après quelques instants, le refroidissement a lieu et le globule, par suite du contact de l'eau, se brise avec une petite explosion.

Quant à la cause qui empêche le contact d'un métal chauffé et d'un liquide, elle se rattache évidemment à la capillarité. Nous avons vu, en effet (79), que la chaleur modifie les actions capillaires, et qu'en particulier les liquides qui mouillent les tubes présentent une ascension moindre et un ménisque moins marqué quand la température s'élève. Il est donc très-aisé de comprendre qu'à une certaine limite de température les liquides se trouvent, par rapport aux métaux chauffés, dans le même cas que le mercure, par exemple, par rapport au verre.

267. Distillation. — La distillation est une opération très-anciennement connue et qui se présente comme une application du phénomène de l'ébullition. Elle a souvent pour objet de séparer un liquide des matières fixes qui sont dissoutes par lui. Par exemple, toutes les eaux naturelles contiennent en dissolution des quantités plus ou moins considérables de substances salines, telles que du bicarbonate, du sulfate, du phosphate de chaux, du chlorure de

sodium, etc. Pour divers usages de la chimie on a besoin de débarrasser l'eau de ces diverses substances, afin d'avoir un liquide tout à fait pur. On l'obtient à l'aide de l'appareil nommé *alambic*.

Il se compose d'une sorte de cornue *a*, appelée cucurbite,

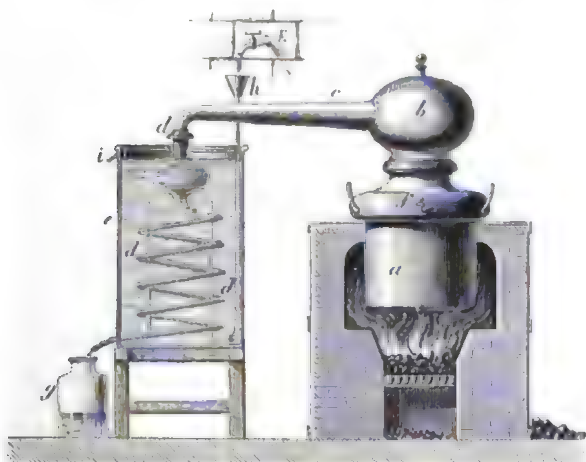


Fig. 257. — Alambic.

fermée par un chapiteau *b* qui, à l'aide de la partie *c*, communique avec un tube contourné en hélice *dd*, appelé *serpentin*. Ce serpentin est placé dans le vase *e*, contenant de l'eau froide. L'eau contenue dans la cucurbite est portée à l'ébullition, la vapeur vient se condenser dans le serpentin, et l'*eau distillée* est recueillie dans le vase *g*.

A mesure que la vapeur se condense, l'eau du réfrigérant s'échauffe et il est important de la renouveler. A cet effet, un tube, plongeant jusqu'au fond du réfrigérant, reçoit par sa partie supérieure *h* de l'eau froide qui arrive d'une manière continue par le robinet K; il se produit donc dans le vase *e* un trop-plein qui s'écoule par l'ajutage *i* placé à la partie supérieure; comme c'est cette partie supérieure du liquide qui est la plus chaude, on voit que cette disposition a pour résultat d'éliminer, pour ainsi dire, d'une manière continue, les couches dont la température est la plus élevée. On remplit la chaudière à peu près aux trois quarts; on peut de temps en temps renouveler l'eau par la tubulure *f*, mais il

convient de ne pas pousser la distillation trop loin et de rejeter le liquide de la chaudière quand son volume est réduit au quart ou au cinquième de son volume initial. Il y aurait à craindre, en effet, si on dépassait cette limite, que quelques-unes des matières fixes contenues dans l'eau ne se décomposassent en donnant des produits qui se mêleraient à l'eau distillée et en altéreraient la pureté.

268. Distillation des liquides alcooliques. — Lorsqu'on distille un mélange de deux liquides inégalement volatils, il passe à la distillation, au moins dans les premiers moments, un mélange dans lequel la proportion du liquide le plus volatil se trouve augmentée. En opérant de la même façon sur le mélange obtenu, on obtient un résultat analogue, et, à l'aide de plusieurs distillations successives, on finit par obtenir un mélange dans lequel domine fortement le liquide volatil, sans qu'il soit pourtant possible d'avoir ce dernier à l'état de pureté. C'est ainsi qu'autrefois on tirait du vin les spiritueux connus sous le nom de *trois-six*. Mais ces opérations répétées, outre leur inconvénient d'augmenter le prix de revient, donnent au produit obtenu un goût d'empyreume très-difficile à faire disparaître.

On obtient aujourd'hui facilement des trois-six de premier jet à l'aide de divers appareils distillatoires perfectionnés. Le principe de celui dont nous donnons la figure, et qui est connu sous le nom d'*appareil Laugier*, consiste à éloigner le réfrigérant proprement dit de la chaudière; dans le trajet se trouve un second réfrigérant où se condense surtout le liquide moins volatil, et le mélange recueilli dans cette partie de l'appareil appelée rectificateur se trouve ramené dans la chaudière pour y subir de nouveau l'action de la chaleur. On y emploie d'ailleurs le vin ou le liquide alcoolique, quel qu'il soit, sur lequel on opère, pour refroidir les serpentins, ce qui permet d'utiliser la presque totalité de la chaleur fournie par le foyer.

L'appareil se compose de deux chaudières, l'une A montée directement sur le foyer, l'autre B chauffée par la chaleur perdue de celui-ci.

La première est munie d'un robinet de vidange et d'un tube indicateur de niveau; elle communique avec la seconde par un

tube t' qui vient plonger au fond du liquide et s'y termine en pomme d'arrosoir. Un autre tube t fait communiquer inversement le fond de la chaudière B avec la partie inférieure de A.

De la chaudière B la vapeur s'élance dans le tube b et se rend dans le rectificateur R Celui-ci est formé de six ou sept tronçons d'hélice dans lesquels la partie la plus déclive, où se réunit le liquide condensé, aboutit à un tube de retour c qui vient se rendre lui-même dans la chaudière B. La vapeur non condensée passe dans le réfrigérant proprement dit R', et le liquide distillé s'écoule dans un vase où plonge un alcoomètre.

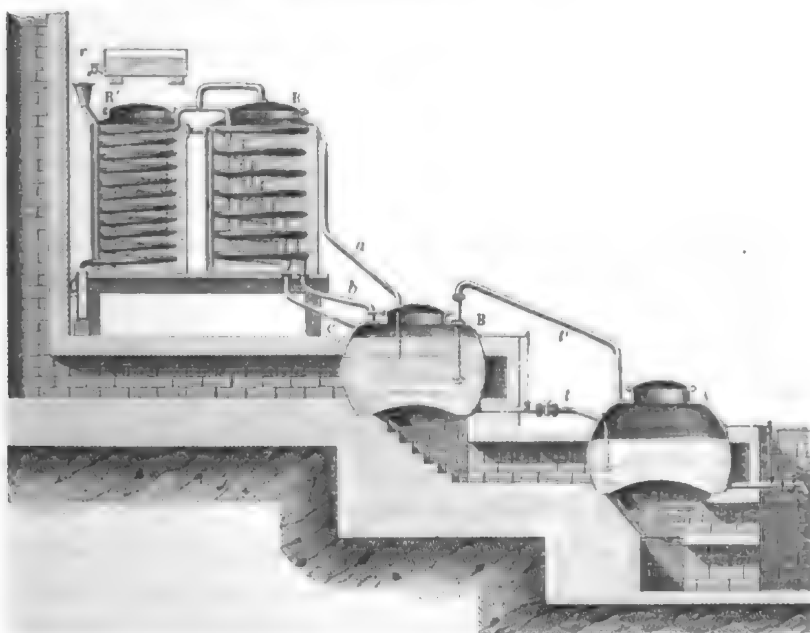


Fig. 258. — Appareil Laugier.

On fait arriver par un robinet supérieur r le vin ou le liquide alcoolique qu'il s'agit de distiller. Celui-ci remplit d'abord le réfrigérant, passe dans le rectificateur et de là dans la chaudière B par le tube a. Lorsque le liquide a atteint la pomme d'arrosoir, ce que l'on reconnaît à l'inspection de l'indicateur de niveau, on arrête l'écoulement, on remplit aux trois quarts la chaudière A, et on chauffe. Pendant ce temps, la partie la plus aqueuse de la vapeur

se condense dans la chaudière supérieure ou y est ramenée du rectificateur, en même temps que la portion alcoolique arrive au serpentin. Le volume du liquide augmente donc dans la chaudière B et diminue dans A; lorsque dans cette dernière le volume est réduit au quart ou au tiers, suivant la richesse du liquide alcoolique, on ouvre le robinet de vidange pour évacuer la *vinasse*. On fait arriver alors du liquide de la chaudière B dans la première, de façon à remplir celle-ci jusqu'au même niveau que la première fois, et on ouvre de nouveau le robinet *r*, qui ne doit plus être refermé. La chaudière B reçoit donc maintenant du liquide de trois sources différentes : 1° celui qui vient directement par le tube *a*; 2° celui qui provient du rectificateur; 3° celui qui résulte de la condensation de la vapeur fournie par la chaudière A. L'ouverture du robinet d'alimentation *r* doit être telle que, en vertu de ces trois causes réunies, cette seconde chaudière se soit emplie lorsque, par suite de la réduction du volume dans la chaudière A, le liquide qu'elle contient est totalement transformé en vinasse. On évacue alors cette dernière et on recommence de la même façon indéfiniment.

269. Circonstances qui favorisent la vaporisation. — Les diverses explications données sur la formation des vapeurs permettent d'assigner les circonstances qui activent la vaporisation, et donnent la plus grande quantité de vapeur dans un temps déterminé.

Quand il s'agit d'un vase ouvert dans l'air, mais non soumis à l'action d'un foyer, l'évaporation est d'autant plus intense, que la surface libre est plus grande, que l'air est plus sec et qu'il est plus vivement renouvelé à la surface du liquide. S'il s'agit d'un générateur chauffé par un foyer, la vaporisation dépend surtout de l'étendue de la *surface de chauffe*, c'est-à-dire de celle qui, baignée à l'intérieur par le liquide, reçoit directement à l'extérieur l'action du foyer. C'est en effet sur les parois, comme nous l'avons vu plus haut, que, par suite de la présence de l'air adhérent, se forment surtout les bulles de vapeur pendant l'ébullition.

CHAPITRE XXVII.

MESURE DE LA TENSION MAXIMA DES VAPEURS.

270. Tension de la vapeur d'eau. — La connaissance de la tension maxima de la vapeur d'eau est importante non-seulement au point de vue théorique, mais aussi au point de vue pratique. C'est, en effet, cette tension qui constitue la force motrice dans les machines à vapeur, et dès lors il est essentiel, pour établir d'une façon rationnelle les principes de la construction de ces appareils, de pouvoir connaître exactement les diverses températures où ils pourront être portés, la valeur exacte de la force qui les met en jeu, afin d'en déduire le degré de résistance qu'ils doivent offrir. Aussi, dans plusieurs pays, des expériences ayant pour objet de dresser une table des forces élastiques de la vapeur d'eau aux diverses températures ont-elles été entreprises et exécutées d'après les ordres de l'administration des travaux publics. Le nombre des travaux de ce genre est donc considérable et plusieurs sont très-remarquables au point de vue scientifique. Toutefois les recherches de M. Regnault, par la multitude des déterminations et l'extrême précision des moyens employés, présentent un caractère particulier d'autorité et semblent avoir mis entre les mains des savants des éléments numériques indiscutables. Nous indiquerons plus loin quelques-unes des méthodes employées par ce savant expérimentateur et les principaux résultats qu'il a obtenus.

271. Appareil de Dalton. — Le physicien anglais Dalton s'est occupé le premier de cette question avec quelque exactitude. s'est servi d'un appareil représenté par la figure 259 et qui a con-

servé son nom. Deux tubes barométriques A et B plongent dans la même cuvette H; l'un est un baromètre ordinaire, l'autre est un *baromètre à vapeur,* c'est-à-dire qu'on a fait passer au-dessus de la colonne mercurielle une petite colonne d'eau. Les deux tubes, maintenus par le support CD, sont entourés d'un manchon contenant de l'eau que l'on peut porter à diverses températures à l'aide d'un foyer. On commence par remplir le manchon de glace fondante, et, en écartant les fragments, on peut lire la différence de niveau du mercure dans les deux baromètres; c'est la force élastique de la vapeur à la température zéro. On remplace ensuite la glace par l'eau et on règle l'action du foyer de façon à obtenir diverses températures comprises entre 0 et 100° et à les maintenir quelques instants stationnaires à l'aide de l'agitateur $p\,q$; on mesure à chaque fois la différence correspondante du niveau du mercure dans les baromètres; on a ainsi des éléments qui, complétés par interpolation ou par des procédés graphiques, donnent la table qu'on a désignée longtemps sous le nom de table de Dalton, et qui renferme les forces élastiques de la vapeur d'eau pour des températures comprises entre 0 et 100°. Le procédé ne peut pas d'ailleurs servir au delà de cette dernière température, car à 100° la tension de la vapeur d'eau étant à peu près égale à la pression extérieure, le niveau du mercure dans le baromètre à vapeur descend jusqu'au niveau du métal dans la cuvette, et l'observation ne peut aller plus loin.



Fig. 259. — Appareil de Dalton.

272. Modifications de M. Regnault. — La méthode de Dalton est défectueuse à divers points de vue : d'une part, il est impossible que la température se maintienne la même dans une aussi

grande colonne que celle que l'on a vers les températures de 70, 75° et au delà. En second lieu, l'observation du niveau à travers la substance du manchon est entourée de beaucoup d'incertitude. M. Regnault, en conservant la méthode, ne l'a employée que jusqu'à la température de 50°. A cette température, la tension de la vapeur n'étant que de 9 centimètres environ, il devient inutile de chauffer toute la longueur des baromètres. La figure 260 représente l'appareil modifié. Les deux tubes barométriques, de 14 millimètres de diamètre intérieur, traversent deux tubulures pratiquées dans le fond d'une caisse métallique. Sur l'une des faces de la caisse se trouve une grande ouverture fermée par une glace, à travers laquelle on peut lire très-exactement les niveaux intérieurs. A raison du peu de hauteur de la colonne liquide, il était très-facile, en approchant plus ou moins une lampe à alcool de la caisse, de maintenir pendant un temps suffisant une température quelconque, comprise entre 0 et 50°.

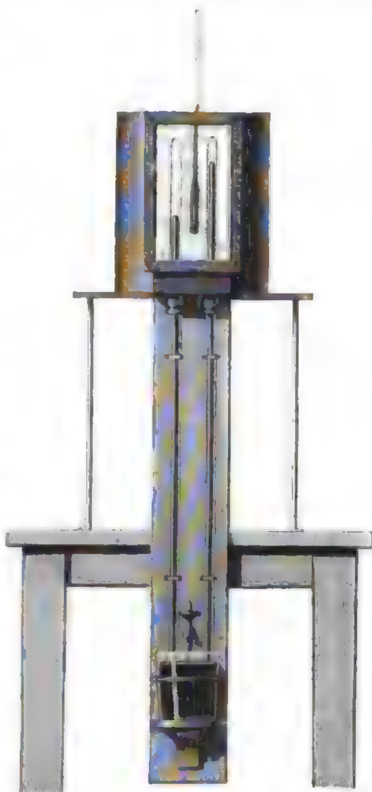


Fig. 260. — Appareil de Dalton modifié.

La différence de niveau des deux colonnes de mercure doit être ramenée par la correction ordinaire à la température de zéro. Il faut aussi tenir compte de la petite colonne d'eau qui se trouve au-dessus du mercure, dans le baromètre à vapeur; elle agit par son poids et produit une dépression qui, exprimée en mercure, est évidemment égale à sa hauteur divisée par 13,59.

Cet appareil est difficilement applicable aux basses températures. Avec une modification fort simple, il peut être employé dans

ce cas et jusqu'à 30° au-dessous de zéro. L'extrémité supérieure du baromètre à vapeur est effilée et vient se mastiquer dans un petit tube en cuivre à trois branches dont la seconde communique avec la machine pneumatique et la troisième avec un ballon de verre de 500 centimètres cubes environ. Dans ce ballon se trouve une petite ampoule en verre mince renfermant de l'eau complétement bouillie et par suite privée d'air. On fait un certain nombre de fois le vide à l'aide du tube à trois branches, et à chaque fois on laisse rentrer de l'air qui a passé sur des matières desséchantes. Après la dernière opération, on ferme à la lampe le tube qui établit la communication avec la machine pneumatique, on met de la glace dans la caisse et on mesure quelle est la force élastique à zéro de l'air sec que la machine pneumatique laisse dans l'appareil; cette force est d'ailleurs très-petite. On approche alors quelques charbons du ballon, l'ampoule se brise et la vapeur se répand dans l'espace. L'appareil ainsi préparé peut être employé comme le précédent, il suffit de faire varier la température de l'eau contenue dans la caisse et d'observer les différences de niveau en tenant compte de la force élastique de l'air qui a été laissé.

Pour s'en servir à des températures inférieures à celles de la glace fondante, on supprime la caisse et on place le ballon *seul* dans une cloche où se trouve un mélange frigorifique; les tubes barométriques se trouvent alors dans l'air extérieur.

Dans ce cas, l'espace occupé par la vapeur est à deux températures différentes, mais il est clair qu'il ne peut y avoir équilibre qu'autant que la tension est la même partout. D'ailleurs, dans le ballon, cette tension ne saurait surpasser la tension maxima correspondante à la basse température qui y règne; donc c'est cette tension qui règne dans tout l'espace, et c'est elle que mesure la différence de niveau du mercure des baromètres.

En réalité, les choses se passent de la manière suivante : A raison de la température qui règne dans le ballon, la vapeur se condense en partie et prend la tension correspondante; il en résulte une rupture d'équilibre, une nouvelle quantité de vapeur se forme, arrive dans le ballon, s'y condense de nouveau et ainsi de suite jusqu'à ce que la tension soit partout celle qui correspond à la température la

plus basse. Cette condensation de la vapeur dans la partie froide de l'espace occupé par elle a été utilisée par Watt dans la machine à vapeur ; c'est le *principe du condenseur.*

Gay-Lussac avait déjà utilisé ce principe d'une façon analogue à celle qui a été employée par M. Regnault pour mesurer les tensions des vapeurs aux basses températures.

En employant des mélanges de chlorure de calcium et de quantités successivement croissantes de neige ou de glace, on peut abaisser la température jusqu'à — 32° et constater que la formation de la vapeur est encore très-sensible à cette basse température.

273. Mesure des tensions maxima aux températures supérieures à 50°. — Pour les températures supérieures à 50°, M. Regnault a utilisé ce fait qu'à la température de l'ébullition la tension maxima de la vapeur produite est égale à la pression extérieure.

Son appareil se compose (fig. 261) d'une chaudière en cuivre renfermant de l'eau qui peut être portée à des températures diverses données par des thermomètres très-exacts. La vapeur produite s'élève le long d'un tube incliné, constamment rafraîchi à l'intérieur par un courant d'eau; de cette façon, la vapeur condensée retourne continuellement à la chaudière, et les expériences peuvent se prolonger autant qu'on le veut. Le tube aboutit à la partie inférieure d'un grand réservoir, dans lequel on peut raréfier ou comprimer l'air, suivant les circonstances; ce réservoir communique d'ailleurs avec un manomètre. La figure représente l'appareil qui a servi pour des pressions s'élevant à 5 atmosphères. Pour des pressions plus considérables et qui ont atteint 28 atmosphères, l'appareil était exactement fondé sur le même principe, mais construit avec de plus grandes dimensions et une plus grande résistance. Le manomètre employé dans ce cas est celui dont il a été question à propos de la loi de Mariotte.

La marche des expériences est facile à comprendre ; on raréfie l'air dans le réservoir jusqu'à ce que l'ébullition de l'eau se produise vers 50°. Il est facile de s'assurer que l'ébullition a lieu par le bruit caractéristique qui l'accompagne et surtout par l'invariabilité de la température. Cette dernière circonstance, qui permet

aux thermomètres de se mettre exactement en équilibre de température avec l'eau, constitue l'avantage le plus marqué de la méthode. La force élastique, accusée au moment de l'ébullition par le manomètre, est précisément la tension de la vapeur produite. En laissant rentrer graduellement l'air dans le réservoir, les températures d'ébullition s'élèvent successivement jusqu'à 100°. A partir de ce moment, l'air, au lieu d'être raréfié, doit être graduellement comprimé dans le réservoir.

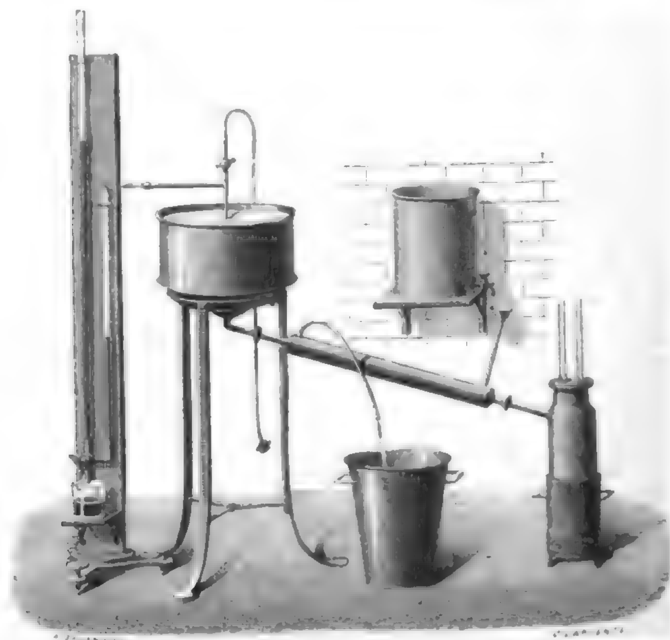


Fig. 261. — Appareil de M. Regnault pour la mesure de la tension maxima de la vapeur d'eau aux températures élevées.

Le tableau suivant contient l'ensemble des résultats obtenus dans les recherches qui viennent d'être indiquées.

TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.
— 32°.	0,32	5°.	6,53
— 20.	0.93	10.	9,17
— 10.	2,09	15.	12,70
— 5.	3,11	20.	17,39
0.	4,60	5.	23,55

TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.	TEMPÉRATURES.	TENSIONS en millimètres.
30°	31,55	70°	233,09
35	41,82	75	288,51
40	54,91	80	354,64
45	71,39	85	433,04
50	91,98	90	525,45
55	117,47	95	633,77
60	148,70	100	760,00
65	186,94		

	TENSIONS en atmosphères.		TENSIONS en atmosphères.
100°	1	180°	9,929
121	2,025	189	12,125
134	3,008	199	15,062
144	4,000	213	19,997
152	4,971	225	25,125
159	5,966	239	27,534
171	8,036		

274. Courbes des tensions. — En comparant les forces élastiques aux températures, on cherche vainement une relation simple entre ces deux éléments, relation qui constituerait la loi physique du phénomène. La loi suivant laquelle les tensions maxima varient avec les températures ne paraît donc pas susceptible d'une expression simple, et quelle qu'elle soit d'ailleurs, les physiciens n'ont pas encore réussi à la mettre en évidence. On peut seulement constater, en examinant avec attention le tableau qui précède, que la tension maxima varie très-rapidement avec la température. Ainsi, tandis que de 0 à 100° cette tension varie d'environ une atmosphère, de 100 à 200° cette variation approche de 15 atmosphères, de 200 à 230° la variation est de 13 atmosphères environ. Ce caractère essentiel du phénomène est rendu sensible aux yeux par la construction graphique des résultats.

Sur une droite horizontale (fig. 262) on porte des longueurs proportionnelles aux températures et on élève des perpendiculaires représentant à une échelle quelconque les tensions correspondantes de la vapeur. En réunissant les extrémités de ces perpendiculaires par un trait continu, on obtient une courbe, qui est l'expression sensible

de la loi des variations de la tension. On voit que cette courbe s'élève très-rapidement au-dessus de l'axe horizontal, et il est tout naturel de penser, d'après cela, que pour employer de la vapeur d'eau saturée à des températures supérieures à 230°, il faudrait des vases doués d'une force de résistance extrêmement considérable et sans doute très-difficile à obtenir.

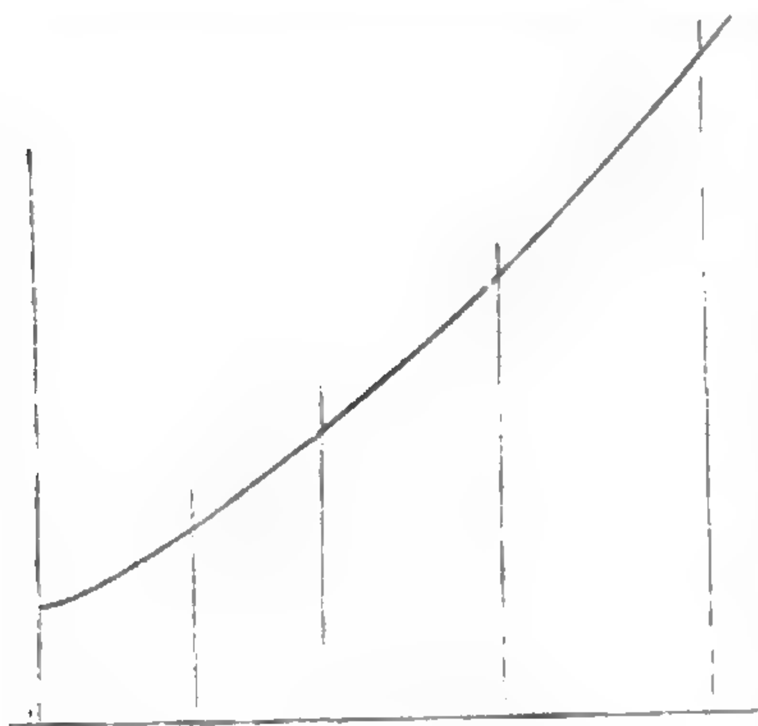


Fig. 262.

275. Formules empiriques.—On a cherché à représenter les résultats obtenus par des formules algébriques. Si l'on trouvait une relation renfermant comme variables la force élastique de la vapeur et la température, et qui permît de déterminer exactement l'un de ces éléments à l'aide de l'autre, on aurait précisément la loi physique du phénomène.

Nous avons dit que cette loi est encore inconnue; mais on peut, sinon rigoureusement, du moins d'une façon assez approchée pour les besoins de la pratique, lier les températures aux tensions par des formules connues sous le nom de *formules d'interpolation* ou *formules empiriques*. Les physiciens en ont proposé plusieurs; M. Regnault emploie la suivante :

$$\log F = a + b\alpha^t + C\beta^t,$$

dans laquelle F désigne la force élastique exprimée en millimètres de mercure et t la température. Les cinq constantes a, b, c, α et β sont déterminées à l'aide de cinq observations réparties à peu près à égale distance de la température de — 32° à celle de 232°. Les résultats donnés par la formule sont très-sensiblement d'accord avec l'expérience, et dans les cas les plus défavorables l'erreur commise atteint à peine $\frac{1}{400}$.

M. Roche et quelques autres savants ont proposé la formule

$F = a\,\alpha^{\frac{1}{1+mt}}$, non-seulement comme une formule empirique, mais comme représentant la loi théorique du phénomène. M. Regnault a fait voir par une discussion détaillée qu'il n'en est pas ainsi, mais il a constaté d'ailleurs qu'en déterminant convenablement les constantes a, α et m, on pouvait se servir de la formule pour représenter approximativement les résultats de l'expérience.

Nous citerons encore la formule donnée par Dulong et Arago :

$$F = (1 + 0{,}7153\,t)^5.$$

Dans cette formule F représente la force élastique en atmosphères, t la température en prenant pour origine 100° et pour unité un intervalle égal aussi à 100°. Comme cette formule ne renferme que deux constantes, elle est facile à retenir et elle donne d'ailleurs des résultats suffisamment exacts.

Applications. — I. Quelle est la tension de la vapeur d'eau à la température de 180°? Il faut faire dans la formule $t = 0{,}80$, ce qui donne

$$F = (1 + 0{,}7153 \times 0{,}80)^5 = (1{,}57224)^5.$$

$$\log F = 5 \log 1{,}57224 = 0{,}9825945.$$

$$F = 9^{at},6.$$

II. — A quelle température la force élastique de la vapeur d'eau est-elle égale à 18 atmosphères?

En faisant dans la formule $F = 18$ on obtient :

$$18 = (1 + 0{,}7153\,t)^5.$$

$$\log 18 = 5.\log(1 + 0{,}7153\,t).$$

$$\log(1 + 0{,}7153\,t) = \frac{\log 18}{5} = 0{,}2510553.$$

$$1 + 0{,}7153\,t = 1{,}7826.$$

$$t = \frac{0{,}7826}{0{,}7153} = 1{,}09 = 209°.$$

276. Tensions des vapeurs de divers liquides. — Dalton avait admis que *les vapeurs des différents liquides ont des forces élastiques égales à des températures également éloignées de celle de leur ébullition.* Ainsi, par exemple, l'alcool bouillant à 78°, la force élastique de la vapeur d'alcool à 70° serait la même que celle de la vapeur d'eau

à la température de 92°. Si cette loi était rigoureuse, il suffirait, pour avoir la tension de la vapeur d'un liquide quelconque, de connaître son point d'ébullition; mais on a reconnu qu'elle est très-loin d'être exacte, et que dans beaucoup de cas elle n'est pas susceptible de donner même des résultats approchés.

M. Regnault a fait quelques expériences directes sur ce sujet en employant les mêmes appareils qui lui avaient servi pour la vapeur d'eau. Il s'est surtout occupé des liquides volatils, tels que l'éther, le sulfure de carbone, le chloroforme, etc., que l'on a depuis longtemps proposé d'utiliser dans les machines à vapeur dites *machines à vapeurs combinées* ou *machines Dutrembley*. Nous empruntons à son mémoire les résultats contenus dans le tableau suivant.

VAPEUR D'ALCOOL.

TEMPÉRATURES.	TENSION en millimètres.	TEMPÉRATURES.	TENSION en millimètres.
— 20°.	3,24	+ 30°.	78,52
0.	12,70	100.	1697,55
+ 10.	24,23	155.	6259,19

VAPEUR D'ÉTHER.

— 20°.	68,90	+ 30°.	634,80
0.	184,39	100.	4953,30
+ 10.	286,83	120.	7719,20

VAPEUR DE SULFURE DE CARBONE.

— 20°.	47,30	+ 30°.	434,62
0.	127,91	100.	3325,15
+ 10.	198,46	150.	9095,94

277. Liquides mélangés et dissolutions. — Lorsque des liquides sans action l'un sur l'autre se vaporisent simultanément dans un espace, chacun d'eux, ainsi qu'on pouvait le prévoir, fournit de la vapeur à la même tension que s'il était seul. C'est un cas particulier de la loi indiquée par Dalton relativement au mélange des gaz et des vapeurs. Mais quand les liquides sont susceptibles de se dissoudre mutuellement, la tension de la vapeur du mélange subit une diminution notable et n'est jamais égale à la somme des tensions des vapeurs séparées.

Lorsqu'on dissout dans l'eau une matière saline fixe, telle que le sel marin, le sulfate de soude, etc., la tension de la vapeur se trouve notablement affaiblie et d'autant plus que la proportion de matière dissoute est plus considérable.

Le même résultat se produit pour les hydrates que l'on obtient en mélangeant l'eau avec les acides concentrés : si l'on se sert particulièrement de l'acide sulfurique, qui n'émet aucune vapeur à la température ordinaire, on pourra, en élevant successivement la proportion d'eau, obtenir des tensions de vapeur graduellement croissantes, mais toujours inférieures à celles que l'on obtiendrait avec l'eau à la même température.

278. Densité des vapeurs. — La densité de la vapeur d'une substance quelconque constitue un élément de la plus haute importance au point de vue chimique, car elle est étroitement liée à la valeur de l'équivalent de la substance elle-même[1]. Les chimistes, pour déterminer cette densité, ne peuvent point se servir de la méthode décrite au chapitre XXIII, et qui ne s'applique qu'aux gaz, plus ou moins éloignés de leur point de liquéfaction aux températures ordinaires. Ils emploient ordinairement un procédé indiqué autrefois par M. Dumas, et qui consiste en général à opérer à une température élevée, de façon que toute la matière soumise à l'expérience soit certainement réduite en vapeur.

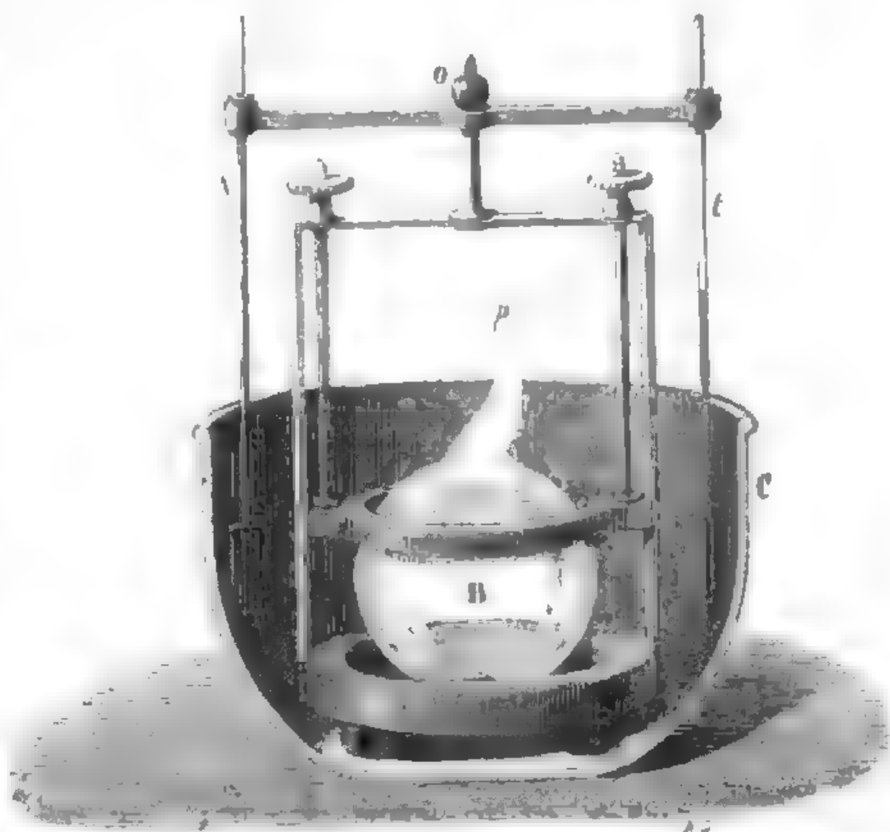


Fig. 263. — Appareil de M. Dumas.

279. Procédé de M. Dumas. — On se sert d'un ballon en verre B dans lequel on introduit la substance qui doit être réduite en

1. Le rapport des densités de deux corps à l'état de vapeur est égal au rapport de leurs équivalents, ou à ce rapport multiplié par un nombre simple. Cette relation constitue ce qu'on appelle en chimie la loi de Gay-Lussac.

vapeur; on le place ensuite dans l'intérieur d'un vase C, contenant un liquide dont la température puisse s'élever plus ou moins, suivant les circonstances. Si l'on n'a besoin, pour vaporiser la substance, que d'une température de 100°, un bain d'eau bouillante suffit. Pour obtenir des températures supérieures, on peut employer de l'eau tenant en dissolution des matières salines, ou même des alliages fusibles. Dans tous les cas, il convient d'agiter le liquide afin de maintenir une température uniforme dans tous les points de la masse liquide; cette température est d'ailleurs indiquée par le thermomètre t.

A mesure que l'on chauffe, la substance sur laquelle on opère se vaporise, la vapeur s'échappe en entraînant l'air. Lorsque le jet de vapeur cesse de se produire, on peut admettre, si la matière à vaporiser a été prise en quantité suffisante, que tout l'air a été expulsé et que le ballon est plein de vapeur à la température T donnée par le thermomètre et à la pression extérieure H. On ferme alors à la lampe l'extrémité effilée p.

280. Calcul de l'expérience. — Les densités de vapeur que l'on trouve mentionnées dans les traités de chimie sont généralement rapportées à l'air; elles expriment *le rapport du poids de la vapeur au poids du même volume d'air, à la même température et à la même pression*. Pour déduire ce rapport de l'expérience précédente, il faut d'abord chercher le poids de la vapeur. A cet effet, lorsque le ballon plein de vapeur est refroidi, on le pèse, on obtient un certain poids P. Préalablement à l'expérience, on avait pesé le ballon plein d'air sec à une température t et à une pression h connues. Soit P' le poids obtenu; la différence P — P' représente évidemment l'excès du poids de la vapeur sur le poids de l'air. Si donc à P — P' on ajoute le poids de l'air, on aura précisément le poids de la vapeur. Or ce poids de l'air se déduit facilement du volume du ballon. Appelons V ce volume à zéro, le poids de l'air que renfermait le ballon au moment de la pesée est représenté, en désignant par K le coefficient de dilatation du verre, par l'expression

$$V(1+Kt)\,1^{gr},293\cdot\frac{1}{1+\alpha t}\cdot\frac{h}{760}$$

le poids de la vapeur que contient le ballon est donc

$$A = P - P' + V(1 + Kt) \cdot 1^{gr},293 \cdot \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{h}{760}.$$

Or cette vapeur occupait, quand on a fermé le ballon, un volume V (1 + KT); elle était d'ailleurs à la température T et à la pression H. Pour avoir sa densité, il suffit donc de diviser A par le poids du même volume d'air à la même température et à la même pression. Ce poids est donné par l'expression

$$A' = V(1 + KT) \cdot 1^{gr},293 \cdot \frac{1}{1+\alpha T} \cdot \frac{H}{760};$$

on a donc pour la densité cherchée

$$D = \frac{A}{A'} = \frac{P - P' + V(1+Kt)\, 1^{gr},293 \cdot \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{h}{760}}{V(1+KT) \cdot 1^{gr},293 \cdot \frac{1}{1+\alpha T} \cdot \frac{H}{760}}.$$

L'exactitude de cette formule suppose qu'il n'est pas resté d'air dans le ballon. Pour s'assurer qu'il en est ainsi, on brise la pointe p du ballon sous le mercure, le liquide se précipite dans le ballon et le remplit en entier, si effectivement il n'y a pas d'air.

Cette expérience donne d'ailleurs le moyen de calculer V; car il suffit de peser le mercure contenu dans le ballon ou de le mesurer dans une éprouvette graduée pour avoir le volume à la température à laquelle on se trouve, d'où on déduit facilement le volume V à zéro.

281. Application. — Pour mieux faire saisir la méthode, nous prendrons les données numériques suivantes qui se rapportent à la détermination de la densité de vapeur du sulfure de carbone.

Excès du poids de la vapeur sur le poids de l'air, $P - P' = 0^{gr},3$; température de la vapeur, $T = 59°$; pression extérieure, $H = 752^{mm},5$; volume du ballon déterminé à 12°, 190 centimètres cubes; température de l'air lors de la pesée du ballon plein d'air sec, $t = 15°$; pression, $h = 765$; $K = \frac{1}{38700}$.

Le volume V du ballon à zéro est

$$\frac{190}{1 + \frac{12}{38700}} = 189^{cc},94 = 0^{lit},18994.$$

Le poids de l'air qui remplit le ballon est

$$0{,}18994 \,.\, 1^{gr},293\left(1+\frac{12}{38700}\right) \cdot \frac{1}{1+12\,.\,0{,}00366} \cdot \frac{765}{760} = 0^{gr},23658.$$

Poids de la vapeur,

$$0^{gr},23658 + P - P' = 0^{gr},53658.$$

Le poids du même volume d'air à la même température et à la même pression est

$$0{,}18994\left(1+\frac{59}{38700}\right) \cdot \frac{1}{1+0{,}00366\,.\,59} \cdot \frac{752{,}5}{760} = 0^{gr},20019.$$

La densité est donc

$$\frac{0{,}53658}{0{,}20019} = 2{,}67.$$

Le procédé de M. Dumas a été utilement modifié par MM. Deville et Troost quand on doit opérer aux températures élevées. Ces températures sont produites par l'ébullition de diverses substances, le chlorure de zinc, le cadmium qui bout à 860°, le zinc qui bout à 1040°. Au-dessus de 800°, le ballon de verre est remplacé par un ballon en porcelaine, que l'on ferme avec le chalumeau à gaz. Quant à la température, on peut la déterminer à l'aide du ballon lui-même comme pyromètre; mais au lieu de se servir d'air qui n'a qu'un poids très-faible aux températures élevées, on lui substitue une vapeur plus lourde, celle d'iode par exemple. En admettant, ce qui est évidemment très-plausible, qu'aux températures élevées où l'on opère, le coefficient de dilatation de la vapeur d'iode soit le même que celui de l'air, du poids de l'iode que le ballon contient on déduit aisément la température. Nous donnons ici le tableau de quelques densités de vapeur obtenues par la méthode précédente :

Eau	0,622	Phosphore.	4,5
Alcool.	1,6138	Cadmium	3,94
Éther..	2,586	Chlorure d'aluminium . .	9,347
Essence de térébenthine..	5,0130	Bromure d'aluminium . .	18,62
Iode	8,716	Chlorure de zirconium . .	8,1
Soufre	2,23	Sesquichlorure de fer. . .	11,39

282. Densités limites. — M. Cahours, en étudiant la densité de vapeur de l'acide acétique, a reconnu que cette densité décroît à mesure que la température s'élève, jusqu'à une certaine température au delà de laquelle il n'y a plus aucune variation sensible. Une circonstance analogue se présente pour toutes les substances, mais à des degrés différents. C'est ainsi, par exemple, que la vapeur de soufre à 500° a été trouvée, par M. Dumas, égale à 6,65, tandis qu'à la température de 1000° environ elle est seulement de 2,23. Cette variation se produit-elle toujours d'une manière continue? N'y a-t-il pas des cas où une sorte de dédoublement de la molécule de vapeur s'effectue brusquement à une température déterminée? C'est un point sur lequel il n'est pas possible de se prononcer absolument.

Quoi qu'il en soit, la densité *limite* est toujours celle qu'il est le plus important de déterminer, et il convient, par conséquent, de se placer dans les conditions de température convenables pour l'obtenir.

283. Méthode de Gay-Lussac. — Gay-Lussac a déterminé la densité de la vapeur d'eau et de quelques autres liquides par une méthode un peu plus compliquée que la précédente, et qui, à raison de cette circonstance, n'a pas été adoptée dans la pratique des laboratoires. Nous la décrivons toutefois, à cause de l'importance de la question qu'elle a servi à résoudre, et dans un intérêt historique.

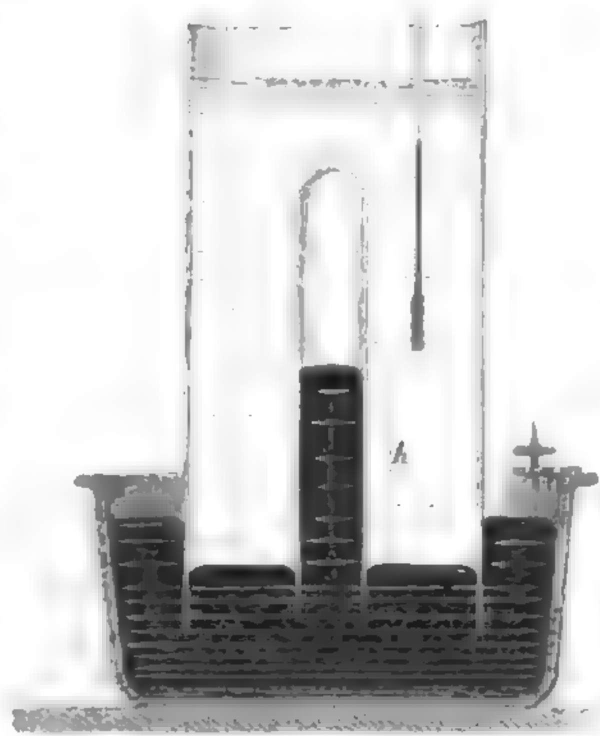


Fig. 264. — Appareil de Gay-Lussac.

Sur une cuvette en fonte renfermant du mercure on renverse une éprouvette graduée en centimètres cubes, par exemple, pleine du même métal. Un manchon en verre contenant de l'eau entoure l'éprouvette, disposition analogue à celle de l'appareil de Dalton. On prend une petite ampoule de verre renfermant un poids donné p d'eau pure et on la fait passer à la partie supérieure de l'éprouvette. On élève alors la température de l'appa-

reil à l'aide d'un fourneau sur lequel il est établi; à un certain moment l'ampoule se brise et l'eau qu'elle contient se réduit en vapeur. Si la quantité d'eau n'est pas trop considérable, elle se réduit entièrement en vapeur; on reconnait qu'il en est ainsi, lorsque à la température de 100° environ le niveau du mercure dans l'éprouvette s'élève au-dessus du niveau extérieur, car s'il y avait du liquide, l'espace serait saturé et la tension serait précisément égale à la pression extérieure. On a donc, par cette disposition d'expérience, le poids d'un volume déterminé de vapeur d'eau. Ce volume, lu directement sur l'éprouvette, est égal à V (1 + KT), V désignant le nombre de divisions occupées par la vapeur; la température T est accusée par un thermomètre plongé dans l'eau du manchon. Quant à la pression, elle est égale à la pression extérieure diminuée de la hauteur *h* du mercure dans l'éprouvette.

Pour avoir la densité, il suffit donc de diviser *p* par le poids d'un volume V (1 + KT) d'air à la température T et à la pression H — *h* :

$$D = \frac{p}{V(1+KT) \cdot 0^{gr},001293 \cdot \frac{1}{1+\alpha T} \cdot \frac{H-h}{760}}.$$

Gay-Lussac a trouvé ainsi pour la densité de la vapeur d'eau environ $\frac{5}{8}$ ou 0,625. D'après des déterminations nouvelles, la moyenne des résultats obtenus est 0,622, nombre qui concorde avec la densité théorique déduite de la composition de l'eau [1].

284. Volume de vapeur formé par un poids donné d'eau. — La connaissance de la densité de la vapeur d'eau permet de calculer l'accroissement de volume qu'éprouve l'eau en passant à l'état de vapeur. Considérons, par exemple, un centimètre cube d'eau à 4°, et cherchons le volume qu'il occupera à l'état de vapeur à 100°. A cette température la tension de la vapeur est de 760 millimètres, et son poids est égal à 0,622 du poids du même volume d'air à la

1. L'eau est composée de 2 volumes d'hydrogène et 1 volume d'oxygène formant 2 volumes de vapeur d'eau. La somme de la densité de l'oxygène et de 2 densités de l'hydrogène est 1,244, dont la moitié est précisément 0,622.

même température et à la même pression. Si donc on appelle V ce volume exprimé en litres, on aura

$$V \cdot 1^{gr},293 \cdot \frac{1}{1+100\alpha} \cdot 0,622 = 1^{gr},$$

d'où

$$V = \frac{1+100\alpha}{1,293 \cdot 0,622} = \frac{1,366}{0,804246} = 1^{lit},698. = 1698 \text{ cent. cubes.}$$

On voit donc qu'un centimètre cube d'eau à 4° occupe à 100° à l'état de vapeur un volume environ 1700 fois plus considérable. Cet énorme accroissement de volume rend compte de l'intensité du travail moléculaire correspondant à la vaporisation, et par suite de la quantité considérable de chaleur nécessaire pour cette transformation.

Lorsque la pression est extrêmement considérable, le liquide peut se réduire en vapeur dans un espace à peine plus grand que celui qu'il occupe lui-même. C'est ce que Cagniard-Latour a observé le premier pour l'éther et l'alcool ; Drion a fait la même observation pour l'éther chlorhydrique, qui éprouve cette transformation vers la température de 170°.

CHAPITRE XXVIII.

HYGROMÉTRIE.

285. État hygrométrique. — On désigne sous le nom d'hygromètres des instruments destinés à mesurer la quantité de vapeur d'eau répandue dans l'air, ou, ce qui revient au même, la force élastique de cette vapeur. Cette détermination a une importance considérable en météorologie. Il faut toutefois remarquer que les phénomènes météorologiques qui sont liés à l'état d'humidité de l'air dépendent surtout, non pas de la quantité absolue de vapeur que l'air contient, mais du rapport qui existe entre cette quantité et celle qui s'y trouverait si l'air était saturé. On conçoit, en effet, que la saturation, par exemple, constitue un état tout particulier dans lequel les moindres modifications peuvent produire la condensation de la vapeur; or cette saturation correspond à des quantités absolues de vapeur très-différentes suivant les températures. De même, de l'air est plus ou moins humide, suivant qu'il est plus ou moins voisin de l'état de saturation, et le même degré d'humidité correspond suivant la température à des quantités de vapeur très-différentes.

On appelle *état hygrométrique* le rapport qui existe entre la quantité de vapeur répandue dans l'air et celle qui s'y trouverait si l'air était saturé, ou, ce qui est la même chose, le rapport de la force élastique de la vapeur d'eau atmosphérique à la force élastique maxima correspondante à la température ambiante. C'est ce rapport qui définit, dans le sens juste du mot, le degré d'humidité de l'air. C'est lui que l'on doit surtout se proposer de déterminer avec les hygromètres.

Il existe plusieurs classes d'hygromètres : 1° les hygromètres d'absorption fondés sur les changements de forme ou de volume qu'éprouvent certaines substances par l'action de l'humidité; 2° les hygromètres de condensation fondés sur le degré de refroidissement qu'éprouve l'air pour être amené au point de saturation; 3° les hygromètres d'évaporation, ordinairement appelés *psychromètres*, fondés sur l'abaissement de température produit par l'évaporation. Nous allons décrire les principaux de ces instruments.

286. Hygromètres d'absorption. — La plupart des matières minérales, et surtout les matières organiques, absorbent plus ou moins l'humidité de l'air dans lequel elles sont plongées et se mettent avec l'air dans un certain état d'équilibre tel, que l'affinité de la substance pour l'humidité soit égale à la force avec laquelle le liquide tend à se vaporiser. Il suit de là que, suivant l'état hygrométrique de l'air, une substance absorbera ou émettra de la vapeur, circonstances toujours accompagnées de variations correspondantes dans les dimensions du corps. Ces variations dépendent elles-mêmes du mode spécial de structure des substances; c'est ainsi, par exemple, que les corps constitués par des filaments éprouvent proportionnellement un accroissement plus considérable dans le diamètre que dans la longueur. Les membranes, telles que le papier, le parchemin, formées d'un entrecroisement de fibres dans tous les sens, s'étendent ou se rétrécissent à peu près comme s'ils étaient homogènes. Les corps à fibres tordues, comme les cordes, se gonflent, se raccourcissent et se tordent davantage par l'action de l'humidité. Un phénomène du même genre, mais inverse, a lieu pour les cordes à boyau, qu'on emploie assez souvent pour faire des espèces d'hygroscopes dépourvus d'ailleurs de toute précision. Un petit bout de corde à violon est fixé invariablement à l'une de ses extrémités;



Fig. 265. — Hygroscope.

l'autre extrémité libre est liée à une pièce mobile dont les positions varient avec le degré d'humidité. La figure 265 représente une disposition très-répandue. L'extrémité libre de la corde porte le capuchon, qui dans l'air assez sec est abaissé. Si l'humidité augmente, la corde en se détordant ramène le capuchon sur la tête du personnage.

L'hygromètre de Wilson est formé par une sorte de thermomètre à mercure, ayant pour réservoir une vessie de rat; Deluc remplace la vessie par une boule mince en ivoire. Tous ces instruments manquent de précision et sont d'ailleurs fortement influencés par les variations de température.

287. Hygromètre de Saussure. — L'hygromètre de Saussure est un instrument susceptible d'une assez grande précision; il est fondé sur l'accroissement de longueur qu'éprouvent les cheveux par l'action de l'humidité.

L'instrument est formé d'un cadre AB, à la partie supérieure duquel se trouve une pince destinée à saisir l'une des extrémités du cheveu. L'autre extrémité est fixée et enroulée partiellement sur la gorge d'une petite poulie *b*, très-légère et très-mobile. Un fil de soie, enroulé en sens contraire et fixé à une deuxième gorge de la poulie, supporte à son extrémité un petit poids *c* de 2 à 3 décigrammes qui maintient le cheveu constamment tendu. A l'axe de la poulie est fixée, par son centre de gravité, une aiguille dont l'une des extrémités se meut sur un cadran divisé *ef*. On voit, d'après cette construction, que si, par suite d'un accroissement d'humidité le cheveu vient à s'allonger, l'aiguille se mouvra vers le point *e*, la diminution de vapeur d'eau dans l'air ambiant donnera lieu à un mouvement inverse.

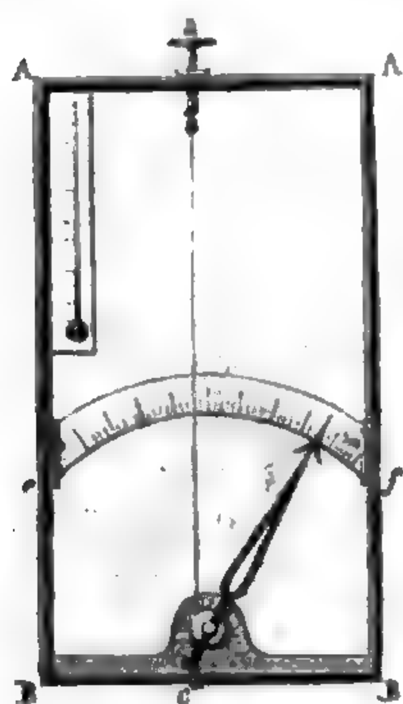


Fig. 266. — Hygromètre de Saussure.

Les cheveux doivent subir, avant d'être employés, une préparation préalable qui a pour objet de les débarrasser de la matière grasse dont ils sont habituellement recouverts. A cet effet, on peut, comme le faisait l'inventeur de l'instrument, les immerger pendant

quelque temps dans une dissolution de bicarbonate de soude cristallisé, les laver ensuite à grande eau et les dessécher. Il paraît préférable, pour ne pas s'exposer à une altération permanente dans la structure des cheveux, de les faire séjourner pendant vingt-quatre heures dans l'éther sulfurique.

288. Graduation de l'hygromètre. — La graduation de l'hygromètre se fait, comme celle du thermomètre, à l'aide de deux points fixes : l'humidité extrême et la sécheresse absolue; le premier point est marqué 100° et le deuxième 0. Les dimensions du cheveu doivent être telles, que ces deux points correspondent à peu près aux extrémités du cadran *ef*; la vis placée à la partie supérieure du cadre, qui permet de soulever ou d'abaisser un peu l'extrémité du cheveu, est destinée à produire à ce sujet une petite rectification quand elle est nécessaire.

On obtient le point d'humidité extrême en suspendant l'hygromètre au-dessous d'une cloche dont les parois ont été mouillées et qui repose d'ailleurs sur l'eau. Au bout de quelques heures l'air est complétement saturé et l'aiguille s'arrête invariablement à une certaine position qui est le point 100 de la graduation. Pour déterminer le 0, on place l'hygromètre dans une masse d'air qui a été complétement desséché. Saussure employait comme corps dessiccateur de la crème de tartre fondue; aujourd'hui on se sert plus ordinairement de chaux vive ou d'acide sulfurique concentré. Il faut beaucoup plus longtemps pour la détermination de ce second point fixe que pour le premier, quelquefois plusieurs jours sont nécessaires, et encore n'est-il pas bien sûr que la dessiccation du cheveu soit absolue. Saussure avait proposé pour reconnaître si ce résultat est obtenu le moyen suivant : On expose l'hygromètre au soleil; si le cheveu est encore humide, une dessiccation nouvelle a lieu et l'aiguille marche vers le 0. Si, au contraire, le cheveu est parfaitement sec, il ne pourra subir qu'un phénomène de dilatation qui aura pour effet de faire marcher l'aiguille vers l'humide. Mais ce moyen peut être illusoire, car si la quantité d'eau qui reste dans le cheveu est très-petite, sa vaporisation peut donner lieu à un mouvement moins marqué que celui qui résulte de la dilatation; l'effet de celle-ci sera donc seule-

ment prédominant, sans qu'on soit en droit de conclure que la dessiccation est complète.

289. Construction de la table de l'hygromètre. — L'hygromètre de Saussure ne donne pas immédiatement l'état hygrométrique, et il est nécessaire de construire une table des degrés d'humidité correspondants aux indications de l'hygromètre. Saussure avait essayé de résoudre cette question par un procédé très-simple, mais un peu grossier. Il introduisait l'hygromètre dans un ballon avec un linge mouillé et pesé d'avance ; la quantité de vapeur aqueuse répandue dans le ballon se déduisait de la perte de poids du linge. Gay-Lussac a opéré d'une manière beaucoup plus précise. Il se servait de dissolutions composées de façon que la tension maxima de la vapeur émise à la même température allât en croissant et se rapprochât de celle que dans les mêmes circonstances émettrait l'eau pure (277). Les tensions étaient déterminées par une méthode analogue à celle qui a été employée par Dalton. On plaçait ensuite l'hygromètre sous des cloches reposant sur chacune des dissolutions ainsi étudiées, et l'on connaissait par conséquent la tension de vapeur correspondante à une indication donnée de l'hygromètre; il suffisait, pour avoir l'état hygrométrique, de diviser la tension de la vapeur qu'émet la dissolution par la tension de la vapeur d'eau pure à la même température. C'est par l'emploi de cette méthode et en complétant les résultats obtenus à l'aide des procédés graphiques que nous avons indiqués plusieurs fois qu'ont été obtenus les nombres que contient le tableau suivant.

TABLE DE GAY-LUSSAC.

DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE.	ÉTAT HYGROMÉTRIQUE.	DEGRÉS DE L'HYGROMÈTRE.	ÉTAT HYGROMÉTRIQUE.
0.	0,0	79.	0.6
22.	0,1	85.	0.7
29.	0,2	90.	0,8
53.	0,3	95.	0,9
64.	0,4	100.	1.0
72.	0,5		

On voit clairement, d'après ce tableau, que les indications de l'hygromètre sont loin d'être proportionnelles à l'état hygrométrique; ainsi lorsque ce dernier est $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire quand l'air renferme la moitié de la vapeur qu'il peut contenir, l'hygromètre marque 72.

Dans l'air extérieur et par les temps les plus secs, l'hygromètre ne descend jamais au-dessous de 40°, nombre qui correspond à une fraction de saturation égale à $\frac{1}{4}$. Même pendant une pluie prolongée, l'air est très-loin d'être saturé et l'hygromètre se maintient toujours au-dessous de 90°.

290. Observations de M. Regnault. — M. Regnault a soumis l'hygromètre à cheveu à un examen très-attentif, dans le but de se rendre compte très-exactement du degré de confiance que méritent les indications de cet instrument. Il s'est attaché particulièrement à la solution des questions suivantes :

1° Un hygromètre donné s'altère-t-il avec le temps? demeure-t-il toujours comparable à lui-même ?

2° Les différents hygromètres construits de la même manière et s'accordant aux points fixes s'accordent-ils dans les points intermédiaires ?

3° La table de concordance entre les degrés de l'hygromètre et l'état hygrométrique varie-t-elle avec la température ?

Sur la première question, on peut dire qu'un hygromètre à cheveu demeure comparable à lui-même, pourvu que l'on ait échappé dans la construction aux chances nombreuses d'altération du cheveu. Cette altération peut résulter de ce qu'on aurait pris un poids trop considérable pour tendre le cheveu; de l'emploi d'une dissolution alcaline trop forte dans l'opération du dégraissage; enfin de la détermination du point 0, la dessiccation absolue du cheveu constituant une condition pour ainsi dire incompatible avec l'état normal de cet organe.

Quant à la comparabilité des hygromètres entre eux, elle peut être admise approximativement quand on n'a pas besoin d'une grande précision, mais elle n'existe pas rigoureusement, et quelque soin que l'on ait pris dans la construction des instruments, on peut

s'attendre à des divergences dans leurs indications pouvant s'élever jusqu'à 4 ou 5 degrés.

Enfin M. Regnault a reconnu la nécessité de construire directement plusieurs tables à diverses températures; toutefois les différences sur ce point sont peu sensibles.

Il est aisé de tirer la conclusion pratique de ces recherches. Puisque dans l'air l'état hygrométrique ne descend jamais au-dessous de $\frac{1}{4}$, on peut se borner à marquer le point d'humidité extrême, et il est inutile de déterminer le 0, ce qui n'offre aucun inconvénient. Une graduation arbitraire étant faite sur le cadran, on construit la table particulière de l'instrument.

M. Regnault ayant déterminé, par les méthodes qui ont été exposées au chapitre XXVII, les tensions de la vapeur de divers mélanges d'acide sulfurique et d'eau, il suffira de reconstituer ces mélanges et d'exposer l'hygromètre au-dessus d'eux. On pourra se servir, par exemple, d'une éprouvette dont les bords supérieurs sont bien rodés, et permettent la fermeture exacte à l'aide d'une plaque. Le mélange d'acide et d'eau est placé au fond de l'éprouvette, et l'hygromètre est suspendu à un crochet fixé à la plaque. En opérant dans l'air raréfié, les déterminations se feront très-rapidement. Il serait facile, d'ailleurs, en plaçant l'appareil dans une boîte contenant de l'eau entretenue à une température déterminée, de faire plusieurs tables pour les diverses températures que l'on peut observer dans l'air extérieur.



Fig. 267. — Hygromètre de Monnier.

On construit depuis quelque temps des hygromètres à cheveu modifiés de façon à être portatifs. La figure 267 donne l'idée de cette disposition, qui est due à M. Monnier. Le cheveu est attaché à

un petit pivot *a* placé sur la paroi de la boîte; de là il passe successivement sur trois poulies, de manière à dessiner un triangle, puis sur une poulie centrale portant l'aiguille, et enfin il vient se rattacher à un petit ressort doué d'ailleurs d'une très-faible tension. Grâce à cette disposition on peut donner au cheveu une longueur d'environ 35 centimètres pour une boîte de 10 centimètres de diamètre. L'aiguille se meut sur un cadran extérieur, et l'appareil a la forme d'un baromètre métallique. La demi-circonférence supérieure est occupée par les degrés de l'hygromètre, l'autre demi-circonférence porte les divisions du thermomètre.

On emploie quelquefois deux cheveux juxtaposés pour donner plus de force à l'organe sensible; dans ce cas le ressort a une force de tension de 6 décigrammes environ, ce qui fait 3 décigrammes par cheveu, conformément aux indications de M. Regnault.

291. Hygromètres de condensation. — Hygromètre de Leroy. — Les hygromètres de condensation sont des instruments dans lesquels on amène la vapeur d'eau de l'atmosphère à se condenser sur un corps artificiellement refroidi. En principe ils sont beaucoup plus exacts que l'hygromètre à cheveu, car ils permettent de déterminer *directement* l'élément que l'on recherche, c'est-à-dire la force élastique de la vapeur d'eau répandue dans l'air, mais ils ont l'inconvénient d'exiger une petite manipulation. Ce ne sont par conséquent pas des instruments d'observation directe, et ils ne se prêtent pas en particulier aux méthodes d'enregistrement graphique, dont les météorologistes font aujourd'hui un usage si général.

La description de l'hygromètre de Leroy, physicien français du dernier siècle, va nous permettre d'indiquer le principe théorique de tous les appareils de même genre.

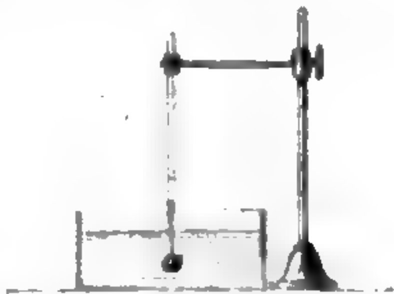


Fig. 268.
Hygromètre de Leroy

Leroy employait un vase (fig. 268) en étain, contenant de l'eau et un thermomètre. A l'aide de morceaux de glace introduits successivement dans le vase, il abaissait la température de celui-ci et par suite celle de la couche d'air qui l'entoure. Comme la quantité de vapeur qui sature un espace est d'autant plus faible que la température est moins élevée, on conçoit que par les progrès

du refroidissement il arrive un instant où l'air qui touche le vase soit saturé. A partir de ce moment, si l'on refroidit encore, une portion de la vapeur se condense sur la surface extérieure du vase. Ce phénomène est rendu sensible par la formation d'un léger voile de rosée qui ternit le brillant de la surface métallique.

La tension de la vapeur d'eau qui se trouve dans la couche d'air voisine du vase est donc la tension maxima correspondante à la température marquée par le thermomètre; elle est d'ailleurs la même que la tension de la vapeur aqueuse répandue dans l'air ambiant, et il suffit, pour la connaître, de consulter les tables de force élastique. En faisant le quotient de cette tension par la tension maxima à la température de l'air ambiant, on aura l'état hygrométrique.

Il convient de remarquer qu'au moment où le dépôt de rosée a lieu, le point de saturation est déjà dépassé, et par conséquent la température marquée par le thermomètre est un peu trop basse; Leroy ajoutait empiriquement un demi-degré. L'instrument est d'ailleurs assez défectueux, l'emploi de la glace ne permet pas d'obtenir un refroidissement prompt et régulier; il est surtout peu rationnel de placer un vase ouvert contenant de l'eau précisément dans la partie de l'atmosphère dont on veut déterminer l'état hygrométrique.

292. Hygromètre de Daniell. — L'hygromètre de Daniell est beaucoup plus exact et d'un emploi très-commode. Il se compose d'un tube recourbé, terminé par deux boules et contenant dans son intérieur de l'éther. L'une des boules A contient un thermomètre *t*. Pour que sa surface soit très-brillante, on la fait quelquefois en verre bleu, d'autres fois on applique sur elle une couche métallique.

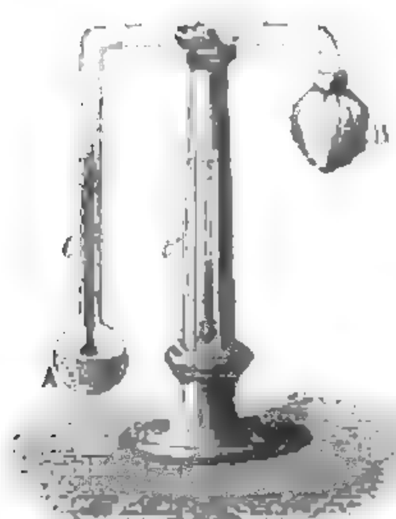


Fig. 269. — Hygromètre de Daniell.

Quand on veut faire une expérience, on commence par faire passer la totalité du liquide intérieur dans la boule A, puis on verse de l'éther à la surface de la boule B, qui est recouverte d'un morceau de toile très-fine. L'évaporation de l'éther produit un refroidissement qui

amène une condensation partielle de la vapeur d'éther dans l'intérieur de la boule; de là résulte une vaporisation nouvelle à la surface du liquide dans la boule A, et par suite un refroidissement. Si l'on examine attentivement la surface de la boule, on saisit un instant où se dépose un léger voile de rosée. On note alors la température marquée par le thermomètre intérieur. Cette température est un peu plus basse que celle qui correspond au point de saturation.

En abandonnant l'instrument à lui-même, on peut saisir l'instant où le voile de rosée se dissipe, la température observée alors est un peu plus forte que celle du point de saturation ; ordinairement on prend la moyenne entre les deux températures ainsi observées. Il convient de placer le réservoir du thermomètre dans les couches supérieures du liquide qui sont le siége de l'évaporation, et de plus de l'appliquer, autant que possible, contre la surface de la boule. Quant à la température extérieure, elle est donnée par un thermomètre t' placé sur le support de l'instrument.

L'hygromètre de Daniell, quoique remarquablement exact, n'est pourtant pas à l'abri de toute critique. Il est assez difficile de régler la marche du refroidissement, qui se fait quelquefois d'une manière très-rapide, ce qui donne lieu, non plus à un léger voile, mais à un dépôt *très-abondant* de rosée. Quand cette circonstance se présente, l'observation est tout à fait incertaine, car la température peut être beaucoup trop basse. En second lieu, l'opérateur, obligé de verser l'éther, se trouve nécessairement près de l'appareil et peut ainsi modifier l'état hygrométrique de l'air. Un résultat analogue peut résulter de l'évaporation de l'éther lui-même, qui peut être plus ou moins aqueux. Ces inconvénients ne se rencontrent pas dans l'instrument perfectionné de M. Regnault.

293. Hygromètre de M. Regnault. — L'hygromètre de M. Regnault se compose (fig. 270) d'un tube de verre fermé inférieurement par un dé en argent D à parois très-minces. L'ouverture supérieure est fermée par un bouchon, à travers lequel passe la tige d'un thermomètre T et un tube de verre t ouvert aux deux bouts. L'extrémité inférieure du tube et le réservoir du thermomètre plongent dans l'éther dont le dé est rempli. Par une tubulure latérale, l'appareil

communique avec un tube vertical UV qui est lui-même en rapport avec un aspirateur A placé à une certaine distance. Lorsqu'on fait écouler l'eau de l'aspirateur, il se produit à travers l'éther un courant d'air qui l'agite et répartit uniformément la température dans

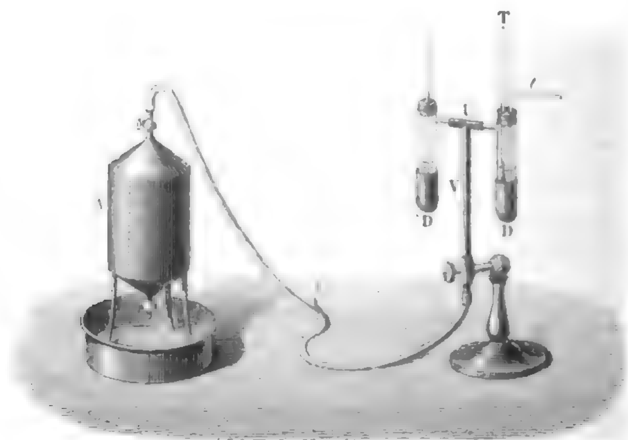


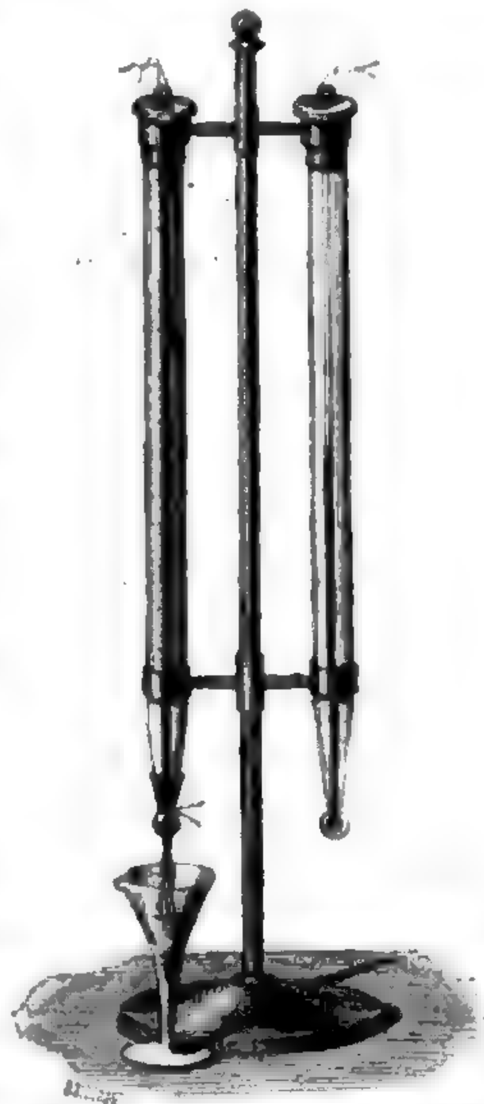
Fig. 270. — Hygromètre de Regnault.

les différents points de la masse. En même temps ce mouvement active l'évaporation et le froid produit amène bientôt le dépôt de rosée que l'on observe de loin avec une lunette. Cette observation est facilitée par le contraste d'aspect d'un second dé dans lequel l'air ne circule pas, et dont la surface demeure par conséquent brillante. Dans ce second dé se trouve le thermomètre qui donne la température extérieure. En ralentissant l'écoulement, le thermomètre remonte et la rosée se dissipe, une nouvelle accélération d'écoulement peut produire un nouveau dépôt, et il est aisé de rapprocher ainsi les deux températures, d'apparition et de disparition de la rosée de manière à les rendre presque identiques. Il est clair que dans ce cas la moyenne des deux représente très-exactement la température correspondante au point de saturation.

Il n'est pas nécessaire, avec l'hygromètre de M. Regnault, d'employer l'éther; l'alcool, beaucoup moins volatil, peut suffire. C'est là un avantage réel, car l'éther bouillant à 36°, il est difficile, dans la saison chaude et surtout dans certaines localités, de le maintenir, même dans les flacons les mieux bouchés.

294. Psychromètres. — Le psychromètre (fig. 271) se compose de deux thermomètres aussi identiques que possible, placés à côté l'un de l'autre.

Le réservoir de l'un d'eux est entouré d'un linge constamment mouillé, d'où résulte une évaporation et par suite un abaissement correspondant de température. Cet abaissement de température dépend évidemment de l'intensité de l'évaporation, laquelle dépend à son tour du degré plus ou moins grand d'humidité de l'air. Il y a donc certainement entre la différence de température des deux thermomètres et l'état hygrométrique de l'air une certaine relation théorique. Mais cette relation est un peu complexe, et c'est à cause de cette circonstance que les hygromètres d'évaporation proposés autrefois par Leslie et Gay-Lussac étaient tombés à peu près dans l'oubli.


Fig. 271. — Psychromètre.

M. August, professeur à Berlin, a fait une étude nouvelle de ces appareils, et proposé, pour en interpréter les indications, la formule suivante :

$$x = f' - \frac{0,429\,(t - t')}{610 - t'}\,h.$$

x est la force élastique de la vapeur d'eau répandue dans l'air, t la température du thermomètre sec, t' celle du thermomètre mouillé, h la pression extérieure, f' la tension maxima de la vapeur d'eau à la température t'.

Le psychromètre, à raison de la simplicité et de la facilité de son emploi, a été adopté par un grand nombre d'observateurs. Toutefois la formule indiquée plus haut est loin de reposer sur des principes incontestables; M. Regnault a montré d'ailleurs, par diverses expériences, que les résultats qu'elle fournit sont souvent erronés d'une manière très-sensible. On aurait une exactitude

beaucoup plus grande si l'on admettait, pour interpréter les indications de l'instrument, la formule

$$x = f' - A(t - t')h,$$

formule dans laquelle chaque observateur déterminerait, pour l'instrument particulier dont il se sert, la valeur de la constante A.

295. Hygromètre chimique. — La détermination de la quantité de vapeur d'eau répandue dans l'air constitue une analyse

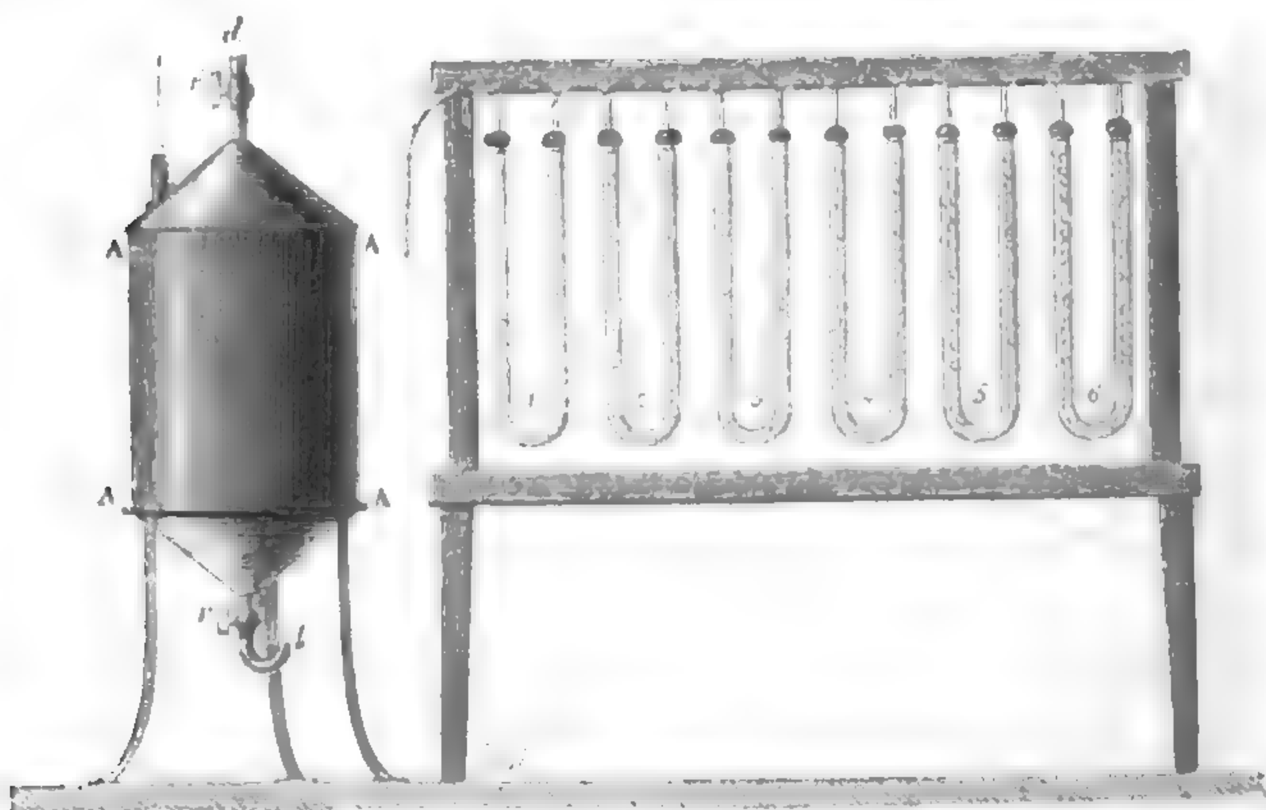


Fig. 272. — Hygromètre chimique.

chimique ordinaire que l'on peut effectuer rigoureusement de la manière suivante :

On se sert d'un aspirateur A, d'une cinquantaine de litres de capacité, que l'on met en communication, par sa partie supérieure, avec le système des tubes en U, 1, 2, 3, 4, 5, 6, remplis de pierre ponce imbibée d'acide sulfurique; l'aspirateur étant plein d'eau, on ouvre le robinet inférieur, le liquide s'écoule et est remplacé par de l'air qui, en traversant les tubes, s'y dépouille complétement de son humidité. Les premiers tubes seulement augmentent de poids. Quant au dernier, il est destiné à absorber la vapeur d'eau qui pourra provenir de l'aspirateur lui-même. Soit p l'augmentation de poids des premiers tubes 4, 5 et 6; c'est le poids de la vapeur d'eau que contenait l'air qui a passé dans l'appareil. Or cet air occupait dans l'aspirateur un volume V qu'il est facile de connaître en jau-

geant l'eau qui s'est écoulée. Cet air s'est de nouveau saturé au contact de l'eau de l'aspirateur, et renferme par conséquent de la vapeur à la tension maxima f correspondante à la température marquée par le thermomètre de l'appareil. Dans l'atmosphère où la température est T, cet air occupait un volume différent qui, d'après les formules connues, est

$$V \cdot \frac{H-f}{H-x} \cdot \frac{1+\alpha T}{1+\alpha t},$$

x désignant la force élastique de la vapeur atmosphérique. Cette vapeur occupe le même volume que l'air, et pèse par conséquent

$$V \cdot \frac{H-f}{H-x} \cdot \frac{1+\alpha T}{1+\alpha t} \cdot 1^{gr},293 \cdot 0,622 \cdot \frac{x}{760} \cdot \frac{1}{1+\alpha T},$$

en supposant que le volume soit exprimé en litres. Si donc on égale cette dernière expression à p, on aura une équation d'où l'on pourra déduire la valeur de x :

$$p = V \cdot \frac{H-f}{H-x} \cdot \frac{1+\alpha T}{1+\alpha t} \cdot 0,622 \cdot \frac{x}{760} \cdot \frac{1}{1+\alpha T} \cdot 1,293,$$

d'où

$$x = \frac{p(1+\alpha t) \cdot 760 \cdot H}{V(H-f)\, 0,622 \cdot 1,293 + p(1+\alpha t)\, 760}.$$

En divisant x par la tension maxima F correspondante à la température de l'air, on aura l'état hygrométrique.

Cette méthode a toute l'exactitude d'une véritable analyse chimique, mais elle est d'une exécution difficile, et d'ailleurs elle ne saurait faire connaître les variations, si rapides quelquefois, de l'humidité atmosphérique ; elle donne seulement la quantité moyenne d'humidité qui se trouvait dans un volume connu d'air pendant toute la durée de l'expérience. Elle est donc impropre aux observations météorologiques, où l'on se propose d'étudier ces variations à des intervalles très-rapprochés et par des procédés rapides. Mais d'un autre côté la rigueur de cette méthode permet de l'employer pour le contrôle des autres procédés. On pourrait s'en servir, par exemple, pour mesurer la valeur de la constante qui entre dans la formule du psychromètre.

296. Poids d'un volume d'air humide. — Les lois relatives aux vapeurs et les formules connues des dilatations permettent de résoudre une question qui se présente très-fréquemment : c'est la détermination du poids d'un volume d'air humide. Soit V ce volume, H sa pression, f la tension de la vapeur d'eau qui s'y trouve contenue et t sa température. On peut distinguer dans ce volume deux parties, un volume V d'air sec à la température t et à la pression $H - f$ dont le poids est, d'après les formules connues,

$$V \cdot 1^{gr},293 \cdot \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{H-f}{760},$$

et un volume V de vapeur d'eau à la température t et à la pression f; ce dernier volume pèse

$$\frac{5}{8} V \cdot 1^{gr},293 \cdot \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{f}{760}.$$

En faisant la somme de ces deux poids, on aura le poids demandé, c'est-à-dire

$$V \cdot 1,293 \frac{1}{1+\alpha t} \cdot \frac{H - \frac{3}{8} f}{760}.$$

297. Relation entre les volumes d'une même masse d'air saturée à des températures et à des pressions différentes. — Supposons une masse d'air en présence d'une quantité d'eau telle, que la saturation soit toujours possible; soit H la pression totale de l'air humide, t sa température et V son volume.

Dans d'autres conditions de température et de pression t' et H', le volume occupé V' sera différent. Les deux quantités V et V' peuvent d'ailleurs être considérées comme des volumes d'air sec aux températures t et t' et aux pressions $H - f$ et $H - f'$; on peut donc écrire (201) la relation

$$\frac{V}{V'} = \frac{H'-f'}{H-f} \cdot \frac{1+\alpha t}{1+\alpha t'}. \qquad (1)$$

Dans le passage d'une condition à l'autre, il peut arriver que, pour que la saturation se maintienne, une nouvelle quantité de vapeur doive se former ; il pourrait arriver aussi qu'une portion de

la vapeur se condensât, enfin il pourrait n'y avoir ni condensation ni formation de vapeur. On peut chercher à reconnaître *à priori*, d'après les données de la formule (1), laquelle de ces circonstances devra se produire. Désignons, à cet effet, par D et D' les densités de la vapeur aux températures t et t'. Supposons, par exemple, $t' > t$ et imaginons que sans changer la pression f on élève la température de la vapeur jusqu'à t' sans qu'elle soit en contact avec son liquide, la vapeur cessera d'être à saturation ; mais si alors on amène la pression jusqu'à f', la saturation se produira de nouveau. En tout cas, la masse de vapeur sera restée la même; et si on suppose qu'elle ait le même coefficient de dilatation que l'air, on pourra, en appliquant la formule indiquée au paragraphe déjà cité, écrire

$$\frac{D}{D'} = \frac{f}{f'} \cdot \frac{1 + \alpha t'}{1 + \alpha t}, \qquad (2)$$

multipliant membre à membre les équations (1) et (2), on a

$$\frac{VD}{V'D'} = \frac{H'f - ff'}{Hf' - ff'},$$

formule d'où l'on déduit les conclusions suivantes :

1° Si $H'f = Hf'$, $VD = V'D'$; le poids de la vapeur est le même dans les deux phases de l'expérience ; il n'y a, par conséquent, ni condensation ni vaporisation ;

2° Si $H'f$ est plus grand que Hf', VD est plus grand que V'D', c'est-à-dire qu'une portion de la vapeur doit se condenser ;

3° Si enfin $H'f$ est plus petit que Hf', c'est que VD est plus petit que V'D', c'est-à-dire qu'une nouvelle quantité de vapeur devra se former pour suffire à la saturation de l'espace. Dans ce cas, on voit qu'on ne pourra se servir de la formule (1) qu'autant qu'on se sera assuré qu'il y a un excès de liquide suffisant pour fournir la nouvelle quantité de vapeur qui doit se former.

Les formules (1) et (2) se rapportent au problème le plus général que l'on puisse se proposer sur les gaz et les vapeurs. En prenant pour inconnues l'une ou l'autre des quantités qui y entrent, on peut en déduire différents problèmes particuliers sur lesquels nous ne nous arrêterons pas ici.

298. Météores aqueux. — On donne le nom de météores aqueux aux divers phénomènes météorologiques qui résultent de la condensation plus ou moins complète de la vapeur d'eau contenue dans l'air : tels sont la pluie, la rosée, le brouillard, etc. Cette condensation de la vapeur peut se produire dans deux circonstances très-différentes. Quelquefois elle est due à la présence d'un corps froid qui amène la couche d'air en contact avec lui à l'état de saturation et provoque ainsi la liquéfaction d'une partie de la vapeur. C'est sur ce fait que sont fondés les hygromètres de condensation. On donne à ce dépôt de l'eau sur la surface d'un corps refroidi le nom de *rosée*. La théorie du phénomène météorologique de la rosée sera donnée plus loin au chapitre XXIX ; mais nous ferons remarquer, quant à présent, que la nature physique et essentielle de ce phénomène consiste dans le dépôt *sur le corps même* de la vapeur d'eau atmosphérique qui a été refroidie par l'action de ce dernier. Lorsque au contraire la vapeur se condense dans l'intérieur même de l'air, l'eau qui provient de cette condensation, obéissant à l'action de la pesanteur, *tombe* à la surface de la terre ; c'est en cela que consiste la pluie.

299. Nuages et brouillards. — Lorsque la condensation de la vapeur a lieu dans l'atmosphère, ordinairement elle n'est pas complète tout d'abord, et il se produit un corps de constitution spéciale qui porte le nom de *nuage* ou de *brouillard*, suivant qu'il se manifeste à une certaine hauteur dans l'air ou bien à la surface du sol.

On donne à la vapeur semi-condensée qui constitue le brouillard ou le nuage le nom de *vapeur vésiculaire*. C'est de la vapeur vésiculaire qui se forme au-dessus d'un vase contenant de l'eau que l'on chauffe ; la vapeur produite à la température du liquide possède naturellement la tension propre à cette température, et, se trouvant tout à coup dans de l'air beaucoup plus froid, elle se condense. C'est aussi de la vapeur vésiculaire qui s'échappe de la cheminée d'une locomotive et en général des diverses issues qui peuvent exister sur un générateur à vapeur, particulièrement lorsque celui-ci est à haute pression. Dans le langage ordinaire on désigne souvent ces corps sous le nom de vapeur, mais c'est une expression impropre, la vapeur d'eau étant transparente et par suite invisible

sous une petite épaisseur aussi bien que l'air atmosphérique.

Les physiciens ne sont pas d'accord sur la constitution des particules des nuages, et la cause de ce dissentiment tient à la nécessité d'expliquer comment ces corps peuvent se maintenir dans l'atmosphère. On a cru pouvoir résoudre cette difficulté en admettant que les nuages sont formés de globules creux; mais l'équilibre d'un pareil globule n'est pas plus facile à comprendre que celui d'un globule plein. D'autre part, on ne voit pas en vertu de quelle force ces globules resteraient creux; l'air enfermé dans leur intérieur doit être à la même pression que l'air extérieur, et dès lors l'attraction mutuelle des particules liquides tend naturellement à expulser cet air, qui se dissoudra graduellement dans la pellicule liquide.

On a objecté contre la théorie qui admet que les nuages sont formés de globules pleins, qu'on devrait voir se produire sur eux l'arc-en-ciel; mais cette objection n'est pas fondée. En effet, quand les globules ont une très-grande ténuité, ils donnent lieu à une diffusion de la lumière, qui empêche les conditions spéciales de réflexion auxquelles l'arc-en-ciel est précisément dû.

C'est en effet à raison de cette ténuité que les particules des nuages se soutiennent dans l'air sans qu'il soit besoin d'avoir recours, pour l'expliquer, à une théorie spéciale, de même qu'on voit flotter dans ce fluide, quand on l'éclaire par un rayon de soleil dans une chambre obscure, une multitude de corpuscules de toute nature et de toute densité. Il est vrai que ces corps flottants continuellement dans l'atmosphère n'y sont jamais en repos; mais il en est de même des particules des nuages. Tous ceux qui ont eu l'occasion, en voyageant dans les montagnes, de se trouver au sein même des brouillards, ont pu constater la très-grande mobilité de leurs parties constitutives, qui cèdent au moindre souffle du vent et sont entraînées par lui comme une fine poussière. Quelquefois cependant les nuages paraissent avoir une sorte de fixité et dans leur position et dans leur forme. Ce n'est là qu'une illusion due à la grande distance à laquelle on les observe. Si même, dans ce cas, on examine avec une attention soutenue le contour du nuage, on le voit s'altérer d'une façon continue et assez rapide. Cela est tout naturel. Quand bien même l'air serait absolument calme dans la

région où le nuage se trouve, ce qu'il est bien difficile d'admettre, les gouttelettes doivent tomber en vertu de la pesanteur. Arrivant dans les régions inférieures où la température est plus élevée, d'une part, et où l'état hygrométrique est moindre, elles se réduisent en vapeur, s'élèvent et viennent se condenser de nouveau aux parties supérieures. Il y a donc pour l'observateur une sorte d'immobilité générale de l'ensemble, mais ses parties constitutives sont en mouvement; c'est une espèce d'équilibre mobile.

300. Forme des nuages. — Rien n'est plus capricieux et plus variable que la forme des nuages. Toutefois les météorologistes sont convenus d'employer certaines expressions pour désigner quelques-unes de ces formes que l'on peut prendre pour types.



Fig. 273. — Les cirrus.

1° Les *cirrus*, ou queues de chat des marins, sont constitués par des nuages blancs en forme de filaments allongés et lâchement juxtaposés. En petit nombre sur un ciel clair, ils sont généralement considérés comme des pronostics de beau temps.



Fig. 274. — Les cumulus.

2° Les *cumulus* (balle de coton) se présentent en monceaux arrondis et séparés les uns des autres. Quand les cumulus occupent une grande partie du ciel, on dit que celui-ci est *pommelé*. Les cumulus s'observent surtout en été; ils s'entassent quelquefois les uns sur les autres et forment ainsi ces gros nuages accumulés à l'horizon et que l'on prendrait pour des montagnes couvertes de neige.

3° Les *stratus* sont formés de longues traînées, généralement droites et superposées, à la façon des strates ou des couches d'un terrain ; assez ordinairement les stratus se forment au coucher du soleil pour disparaître à son lever.



Fig. 275. — Les stratus.

4° Les *nimbus* sont les nuages qui se résolvent en pluie; c'est sur eux exclusivement que se produit l'arc-en-ciel. Vus de loin, ils apparaissent sous la forme de masses plus ou moins sombres sur lesquelles se détachent des lignes parallèles verticales ou légèrement inclinées.

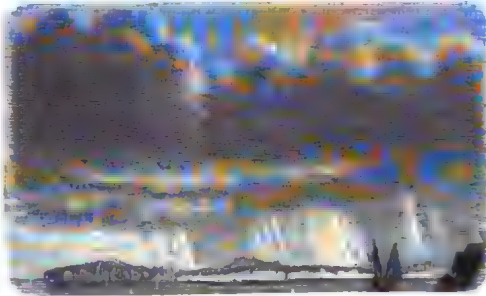


Fig. 276. — Les nimbus.

A ces formes, pour ainsi dire simples, les météorologistes rattachent des formes composées sur lesquelles d'ailleurs il est souvent difficile d'être d'accord; telles sont les *cirro-cumulus*, les *cirro-stratus*, etc. Ces mots n'ont pas besoin d'explication.

301. Causes de la formation des nuages ou des brouillards. — Les nuages n'étant autre chose que de la vapeur condensée, leur formation est subordonnée aux causes qui amènent la liquéfaction de la vapeur. Cette liquéfaction est toujours le résultat d'une quantité de vapeur supérieure à celle qui, à un certain moment, est capable de saturer l'espace où elle se trouve.

C'est ainsi, par exemple, qu'à mesure que les vapeurs formées à la surface du sol s'élèvent dans l'atmosphère, elles peuvent, à raison du décroissement de la température avec la hauteur, rencontrer des couches qui se trouvent plus que saturées par elles. On

sait d'ailleurs, par l'ensemble des observations faites sur ce point important, que le décroissement de la température avec la hauteur est extrêmement variable, qu'il dépend d'une foule de circonstances qui en peuvent changer l'intensité plusieurs fois dans la même journée; aussi voit-on souvent un ciel nuageux s'éclaircir, pour ainsi dire, instantanément, comme d'autres fois les nuages se forment sur tous les points simultanément avec une extraordinaire rapidité, et ces deux phénomènes se produisent souvent d'une manière alternative et très-fréquente. On conçoit que si le décroissement de la température était très-lent, les conditions de la condensation de la vapeur ne pourraient se rencontrer jamais, comme aussi elles se trouveraient réalisées d'une manière invariable à une certaine hauteur si le décroissement était toujours soumis à une loi suffisamment rapide. Le ciel serait toujours serein dans le premier cas, et toujours couvert dans le second. Cette variation dans un fait fondamental, qui au premier abord se présente comme une sorte d'irrégularité fortuite, a donc pour résultat d'amener dans l'état du ciel des variations correspondantes et très-propres, au moins dans la plupart des cas, au développement normal des phénomènes de la végétation.

La quantité de vapeur saturante diminuant rapidement avec la température, on conçoit que les vents chauds, et particulièrement ceux qui passent au-dessus des grandes masses liquides, doivent amener ordinairement la formation des nuages; c'est ce qui a lieu, en particulier, à Paris pour les vents d'ouest et du sud; c'est le contraire pour les vents du nord et d'est, qui sont généralement secs. A raison de la même circonstance, la simultanéité de deux vents à deux températures différentes doit amener fréquemment la condensation de la vapeur. En effet, dans les masses d'air mélangées, il tend à s'établir à la fois une certaine température moyenne et une pression moyenne pour la vapeur d'eau; mais la tension maxima de la vapeur croissant plus rapidement que la température, la tension moyenne qui tend à s'établir peut surpasser et surpasserait certainement, si les deux masses étaient saturées, la tension maxima que le mélange peut admettre à la température qu'il doit posséder. De là nécessairement une précipitation de

vapeur à l'état liquide. A la surface de la terre, on observe fréquemment des brouillards le matin et le soir. Le soir, ils se répandent partout, et le matin, principalement au-dessus des rivières et des lacs.

Les brouillards du soir sont dus simplement au refroidissement rapide de l'air qui se produit après le coucher du soleil. Le matin, ils sont dus à une autre cause. L'eau, par suite de son grand calorique spécifique, se refroidit beaucoup moins que l'air ambiant, de sorte que la vapeur qui s'échappe le matin de la masse liquide arrive au milieu d'un air plus froid et s'y condense en partie. Il en résulte un brouillard, assez limité d'ailleurs, que la chaleur du soleil levant ne tarde pas à dissiper.

Tout le monde connaît ces brouillards épais, intenses, souvent odorants et qui, au lieu de faire marcher l'aiguille de l'hygromètre vers l'humidité, produisent un phénomène opposé; ces brouillards secs sont assez fréquents dans certains pays, en Hollande par exemple, et sont dus à une cause tout à fait inconnue.

302. Pluie. — D'après ce que nous avons admis sur la constitution des nuages, il faut admettre qu'un nuage donne sans cesse de la pluie, puisque les gouttelettes qui le forment tendent sans cesse à obéir à l'action de la pesanteur. Toutefois, tant que ces gouttelettes sont très-petites, elles s'évaporent dans leur chute et n'arrivent point jusqu'au sol. Ce n'est que lorsque les gouttes ont atteint un certain volume que se produit véritablement le phénomène de la pluie.

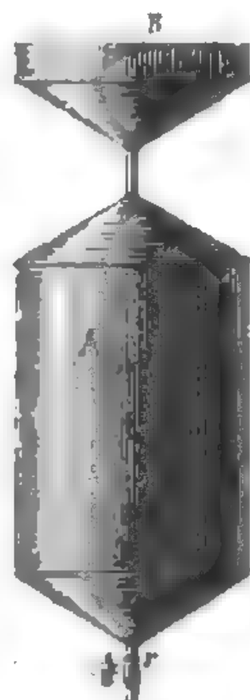


Fig. 277. Pluvimètre.

On évalue la quantité de pluie qui tombe annuellement dans un lieu donné en la supposant répartie régulièrement sur le sol et estimant l'épaisseur de la couche qu'elle y formerait. On se sert à cet effet d'instruments appelés pluvimètres ou udomètres. Ils se composent d'un entonnoir B qui reçoit l'eau et la conduit dans un réservoir A. Chaque jour on la recueille à l'aide du robinet *r*, et on calcule d'après son poids la hauteur qu'elle aurait si elle avait la forme d'un cylindre ayant même base que l'entonnoir.

Dans les météorographes, on emploie assez souvent la dispo-

sition suivante. La pluie qui tombe dans l'entonnoir coule par un tuyau sur une roue à augets, qui éprouve d'après cela un mouvement de rotation. Ce mouvement se transmet par divers engrenages à un tambour sur l'une des faces duquel un organe traceur vient périodiquement imprimer une marque. La distance angulaire des traits ainsi obtenus donne la quantité de pluie tombée dans l'intervalle de temps correspondant.

303. Neige. — Grêle. — Grésil. — La neige est probablement due au passage direct de la vapeur d'eau à l'état solide. Il en résulte une sorte de cristallisation par sublimation; aussi, en observant à la loupe les éléments des flocons de neige, y reconnaît-on toujours une symétrie se rapportant au système hexagonal auquel appartient la glace. La figure 278 montre diverses formes de flocons de neige observées par le capitaine Scoresby pendant un long séjour aux régions polaires.

Dans ces contrées très-froides, l'atmosphère est souvent remplie de petites aiguilles de glace ayant la forme de prismes triangulaires, et qui donnent lieu aux phénomènes des halos et des parhélies.

Le grésil est une sorte de neige dure formée de flocons arrondis et de petites dimensions. On peut en expliquer la formation en admettant que la neige, formée d'abord, a éprouvé un commencement de fusion suivi d'une congélation ultérieure. Quant à la grêle, elle est due sans doute originairement à la congélation de petites gouttes de pluie traversant des couches de l'atmosphère où la température est inférieure à 0; mais le séjour dans l'air de ces petits noyaux glacés, qui s'y accroissent jusqu'à former des grêlons très-volumineux, se rattache soit à des phénomènes électriques, soit aux mouvements de l'air produits dans les cyclones.

304. Verglas. — Le verglas est une couche très-mince et très-glissante de glace qui se forme à la surface du sol dans deux circonstances différentes : 1° quand, après plusieurs jours d'un froid rigoureux, il tombe une petite pluie fine qui se congèle immédiatement par son contact avec le sol ; 2° quand une mince couche de neige ou de grésil ayant commencé à se fondre éprouve une regélation nouvelle.

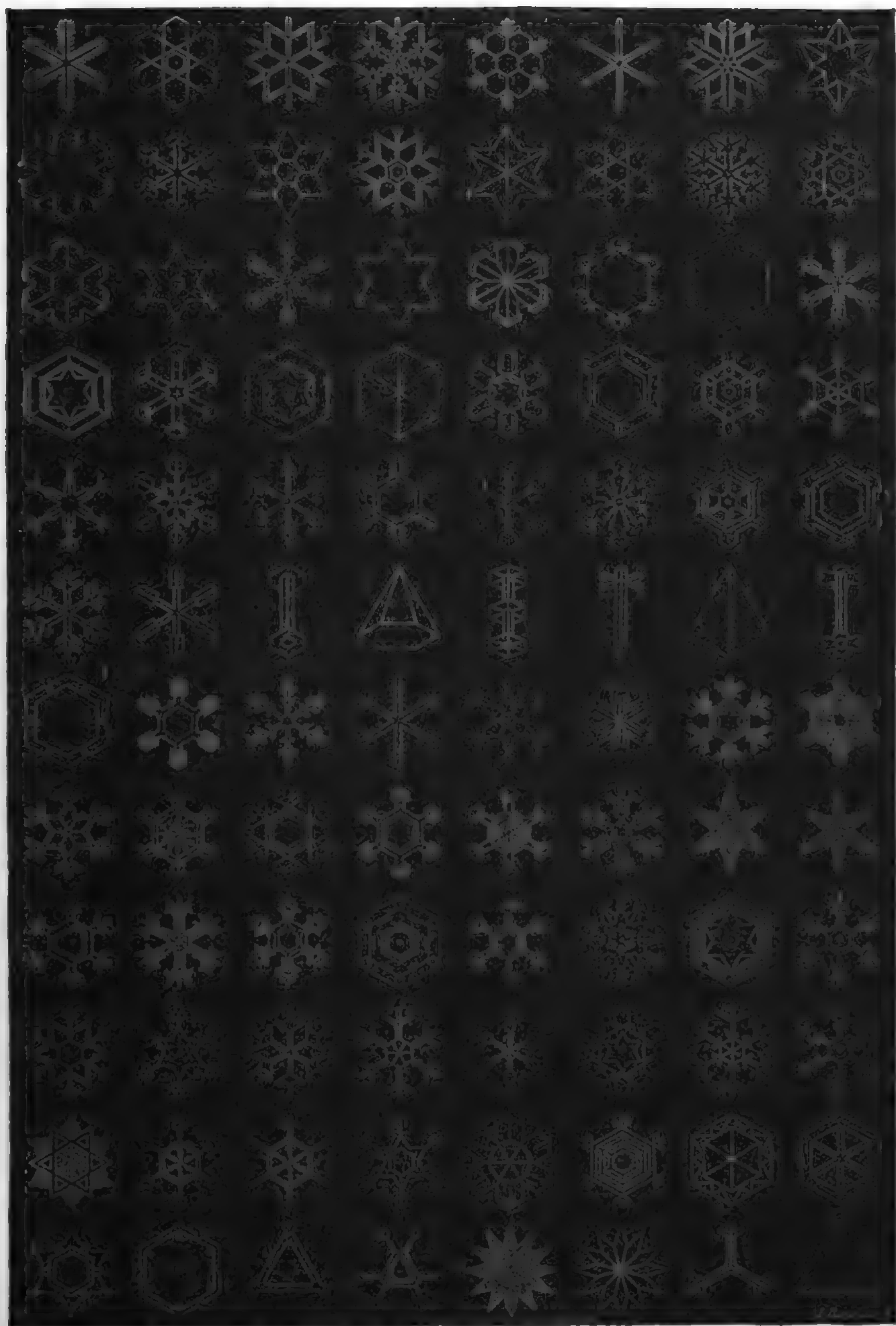


Fig. 278. — Forme des flocons de neige.

CHAPITRE XXIX.

CHALEUR RAYONNANTE.

305. Rayonnement. — Lorsque deux corps à des températures inégales sont placés en présence l'un de l'autre, il se produit entre eux, à travers la distance plus ou moins grande qui les sépare, un échange inégal de chaleur; le corps le plus chaud se refroidit, tandis que l'autre s'échauffe, et au bout de quelque temps ils atteignent tous les deux la même température. C'est à cette propagation à distance de la chaleur que l'on donne le nom de *rayonnement* et la chaleur qui se trouve dans cette condition physique s'appelle *chaleur rayonnante.* C'est par voie de rayonnement que nous recueillons la chaleur produite par un foyer, c'est de cette façon que nous arrive la chaleur du soleil, en traversant l'espace vide qui nous sépare de cet astre.

Cette dernière circonstance nous montre clairement que le rayonnement est un phénomène propre de propagation, indépendant de l'existence de tout milieu pondérable; toutefois, comme la chaleur solaire est lumineuse, il y avait quelque intérêt à montrer que la chaleur obscure peut aussi se propager dans le vide.

C'est ce que montra Rumford à l'aide de l'expérience suivante : Il construisit un baromètre (fig. 279) dont la partie supérieure communiquait avec un ballon au centre duquel se trouve le réservoir *a* d'un thermomètre soudé par la tige à la partie supérieure. Le ballon constitue ainsi la chambre barométrique de l'appareil et se trouve par conséquent vide de toute matière pondérable. A l'aide d'un chalumeau, il ramollit le tube au-dessous du ballon et put

ainsi isoler complétement ce dernier; il le plongea alors dans une caisse contenant de l'eau chaude et il vit immédiatement le thermomètre s'élever et indiquer une température évidemment supérieure à celle qui aurait pu se propager par communication à l'aide de la soudure du thermomètre. Les parois du ballon avaient donc rayonné directement à travers l'espace vide qui les sépare du réservoir *a*.

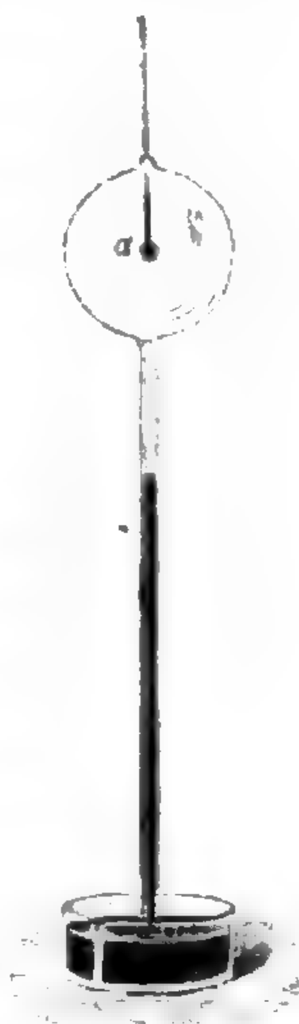


Fig. 279. Expérience de Rumford.

306. La chaleur se propage en ligne droite.— Dans un même milieu le rayonnement de la chaleur se fait en ligne droite. Si, par exemple, entre un thermomètre et une source de chaleur on dispose des écrans percés d'ouvertures telles, qu'une ligne droite puisse être menée sans interruption de la source au thermomètre, la température de celui-ci s'élève immédiatement; si les ouvertures cessent d'être en ligne droite, l'échauffement n'a plus lieu, la chaleur est interceptée par les écrans.

On appelle rayon de chaleur la ligne droite suivant laquelle s'effectue la propagation, et on dit que des différents points d'un corps chaud partent des rayons de chaleur, ou que le corps chaud émet des rayons de chaleur qui se propagent en ligne droite.

En employant un pareil langage, on semble adopter implicitement l'hypothèse que la chaleur est une sorte de fluide subtil (calorique) accumulé dans les corps et que ceux-ci lancent dans l'espace suivant toutes les directions possibles. Un rayon de chaleur serait alors constitué par la file des molécules de calorique qui se propagent suivant une certaine direction.

En réalité, la définition du rayon de chaleur que nous avons donnée est indépendante de toute hypothèse et purement expérimentale; elle est simplement l'expression du fait incontestable de la propagation rectiligne. Quelle que soit l'idée que l'on adopte sur la nature de la chaleur, il faudra nécessairement que cette propagation rectiligne en soit une conséquence.

On admet assez généralement aujourd'hui que la chaleur et la

lumière sont le résultat d'un mouvement vibratoire qui se transmet dans l'espace par l'intermédiaire d'un fluide appelé éther; dans cette théorie, les rayons lumineux sont précisément les diverses lignes aboutissant au centre d'ébranlement et suivant lesquelles celui-ci se propage à travers l'éther.

307. Loi du refroidissement. — La loi suivant laquelle se refroidit un corps placé dans une enceinte dont la température est inférieure à la sienne, est importante à connaître dans une foule d'expériences, car elle permet de tenir compte des quantités de chaleur perdues ou gagnées par voie de rayonnement. Dans le cas général d'un excès de température quelconque, la loi du refroidissement est extrêmement complexe et dépend d'ailleurs non-seulement de la valeur de cet excès, mais aussi de la nature et des conditions physiques du milieu ambiant. Mais lorsque l'excès de température est médiocre, on peut, avec beaucoup d'approximation et dans tous les cas, se servir de la loi qui porte le nom de *loi de Newton;* elle consiste en ce que, à chaque instant, *l'abaissement de température est proportionnel à l'excès de la température du corps qui se refroidit sur la température ambiante.*

Pour vérifier expérimentalement cette loi, on observe les excès de température successifs que possède un thermomètre abandonné à son refroidissement naturel. Si les observations se font à des intervalles de temps égaux, on trouve que ces excès forment les termes d'une progression géométrique décroissante, dont la raison varie d'ailleurs avec la nature de la surface du réservoir thermométrique.

Il est facile d'exprimer algébriquement ce fait expérimental. En effet, si on désigne par θ_0 l'excès initial de température, on pourra écrire qu'au bout d'un temps donné t l'excès θ devra être égal à θ_0, divisé par un certain nombre élevé à une puissance marquée par le temps. On a ainsi la relation

$$\theta = \frac{\theta_0}{m^t} = \theta_0 m^{-t}. \qquad a)$$

Une seule observation permettra, dans les différents cas particuliers, de déterminer la quantité caractéristique m.

Le calcul appliqué à la formule (a) permet de déterminer l'abaissement de température qui, à partir d'un moment donné, se produirait dans l'unité de temps, si pendant toute la durée de cette unité de temps le flux de chaleur qui sort du corps était constant et le même qu'aux premiers instants; cette quantité, fort importante à considérer quelquefois, porte le nom de *vitesse du refroidissement*; elle est analogue, à quelques égards, à ce que nous avons appelé vitesse dans un mouvement varié. Les règles ordinaires de l'analyse donnent, pour l'expression de cette quantité :

$$V = -\theta_0 m^{-t} . \frac{\log m}{\log e},$$

e désignant le nombre 2,71828..... qui forme la base de ce qu'on appelle les *logarithmes népériens*. Si on remplace par une constante déterminée A le quotient $\frac{\log m}{\log e}$ et qu'on remarque d'ailleurs que $\theta_0 m^{-t}$ est égal à θ, la dernière formule devient

$$V = -A\theta.$$

Le signe — signifie qu'il s'agit d'un abaissement de température, et l'on voit que cet abaissement, dans les conditions qui définissent la vitesse du refroidissement, est proportionnel à l'excès même de température du corps qui se refroidit. Mais cette conséquence est évidemment applicable à l'abaissement qui se produit à chaque instant pendant un temps très-court; la loi de Newton, énoncée comme nous l'avons fait plus haut, se trouve donc justifiée. Ce qu'il est surtout essentiel de remarquer, c'est que, par l'observation du refroidissement d'un corps, on pourra déterminer la valeur de la constante qui entre dans l'expression de la vitesse du refroidissement, et, cette dernière étant connue, on pourra calculer les variations de températures qui se produisent dans un corps qui s'échauffe ou se refroidit par voie de rayonnement; nous verrons plusieurs exemples de cette application dans le chapitre de la calorimétrie.

Lorsqu'il s'agit de petites variations de température, on peut admettre sensiblement, ainsi que nous le verrons à propos des calorifiques spécifiques, que ces variations sont proportionnelles aux

variations mêmes de la quantité de chaleur, de sorte qu'on peut donner à la loi de Newton cet énoncé souvent utilisé : *La quantité de chaleur que perd un corps qui se refroidit est à chaque instant proportionnelle à l'excès de sa température sur la température ambiante.*

308. Loi du carré des distances. — Si l'on place un thermomètre très-sensible à diverses distances d'une source de chaleur, on observe des excès de température qui sont d'autant plus faibles que la distance est plus grande, ce qui veut dire que l'intensité de la chaleur rayonnée diminue avec la distance. Un pareil résultat est évident *à priori*, car si, par exemple, la chaleur est le résultat d'un mouvement, à mesure que celui-ci se propage, il se communique à des sphères de rayons successivement croissants, et par conséquent l'intensité en un point particulier doit devenir de plus en plus faible. On peut du reste saisir par l'expérience la loi de cette variation. En effet, lorsque l'excès de température du thermomètre est devenu stationnaire, c'est que la quantité de chaleur qu'il reçoit est égale à celle qu'il perd par rayonnement ; mais cette dernière est, d'après la loi de Newton, proportionnelle à l'excès de la température sur la température ambiante ; cet excès peut donc être considéré comme la mesure de la chaleur reçue. Or on constate, en opérant à diverses distances, que ces excès sont inversement proportionnels aux carrés des distances ; on peut donc en conclure que *l'intensité de la chaleur reçue d'une source à diverses distances varie en raison inverse du carré de la distance.*

Une expérience très-ingénieuse, due à M. Tyndall, donne une autre démonstration de cette loi fondamentale.

On se sert, comme thermomètre, de la pile de Melloni qui va être décrite un peu plus loin, et on dispose (fig. 280) sur sa face antérieure un cône noirci en dedans, de manière à empêcher toute réflexion de chaleur sur sa surface interne. On place la pile en S et S' au-devant d'un vase rempli d'eau bouillante et couvert de noir de fumée sur la face qui regarde la pile. Or on remarque que, quelle que soit la distance, l'indication thermométrique reste constante. Ce résultat est la démonstration même de la loi du carré des distances. En effet, d'après la disposition adoptée, la pile ne reçoit exclusivement de la chaleur, dans la première expérience, que de

la surface AB, dans la seconde que de la surface A'B'. Ces deux surfaces sont des cercles dont les rayons sont proportionnels aux distances SO et S'O, et dont les surfaces sont par conséquent proportionnelles aux carrés des mêmes quantités. Or, puisqu'elles

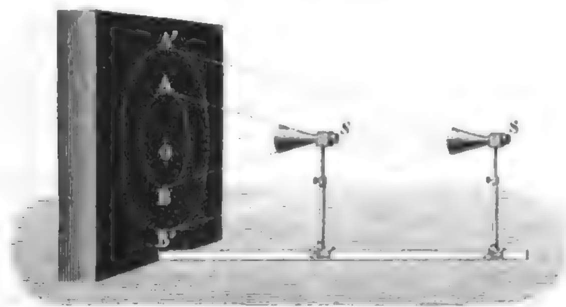


Fig. 280. — Loi du carré des distances.

envoient finalement à la pile la même quantité de chaleur, c'est que l'intensité du rayonnement varie en raison inverse du carré des distances SO et S'O.

On peut aussi concevoir *à priori* la loi des distances par le raisonnement suivant :

Supposons un point rayonnant, et décrivons autour de ce point comme centre une sphère, la totalité de la chaleur émise sera reçue par cette sphère, dont les différents points éprouveront un effet calorifique déterminé. Si l'on imagine une sphère de rayon double, la même quantité de chaleur sera reçue par sa surface, qui est quatre fois plus grande que celle de la première sphère, et par conséquent un élément de surface de même étendue que sur la première sphère recevra une quantité de chaleur quatre fois plus petite, ce qui est conforme à la loi énoncée. Remarquons toutefois que la rigueur de cette démonstration n'est qu'apparente ; elle suppose que la chaleur est une sorte d'effluve réel émis par le point rayonnant. Dans l'hypothèse où la chaleur serait un ébranlement de l'éther, la démonstration devrait être modifiée de telle façon qu'elle perdrait le caractère de simplicité auquel elle doit certainement d'être indiquée dans tous les traités de physique.

309. Loi de la réflexion de la chaleur. — Lorsqu'un rayon de chaleur rencontre une surface présentant un certain degré de

poli, il se réfléchit suivant une direction qui est soumise à des lois très-précises.

Si au point d'incidence, c'est-à-dire au point où le rayon calorifique rencontre la surface, on mène une normale ou perpendiculaire à cette dernière, on détermine un plan formé par les deux droites, et qu'on appelle *plan d'incidence.* Cela posé, les lois de la réflexion de la chaleur sont les suivantes :

1° Quand un rayon de chaleur est réfléchi par une surface, la réflexion se fait dans le plan de l'incidence ;

2° L'angle que fait le rayon réfléchi avec la normale (angle de réflexion) est égal à l'angle que fait le rayon incident avec la même normale (angle d'incidence).

Ces lois sont précisément celles de la réflexion de la lumière, ainsi que nous le verrons plus tard; nous verrons aussi que, dans le cas des rayons lumineux, elles sont susceptibles d'une vérification très-rigoureuse. Comme d'ailleurs tous les phénomènes dans lesquels la chaleur et la lumière se trouvent associées établissent que la même loi s'applique aux rayons calorifiques et aux rayons lumineux, on peut considérer la démonstration faite pour la lumière comme applicable à la chaleur.

310. Miroirs ardents. — On peut aussi trouver la vérification

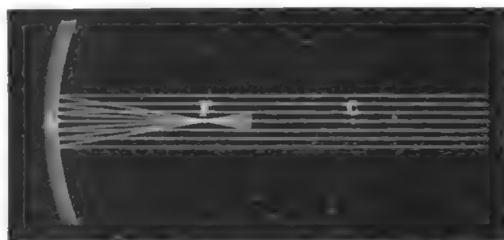


Fig. 281. — Foyer dans un miroir concave.

de la loi propre à la chaleur dans des phénomènes bien connus. Ainsi, par exemple, si l'on considère un miroir formé par une portion de sphère polie sur sa surface intérieure, on a ce qu'on appelle un miroir sphérique concave (fig. 281). L'axe principal de ce miroir est une droite CF passant par le centre de la sphère et par le centre de figure A ou le *pôle* du miroir lui-même. On déduit très-aisément de la loi de la réflexion que si un faisceau lumineux est formé de

rayons parallèles à l'axe, ces rayons après la réflexion viendront concourir à peu près en un même point F situé au milieu du rayon et que l'on nomme le foyer principal. Il n'est pas nécessaire du reste que les rayons soient parallèles à l'axe principal, il suffit qu'ils soient parallèles entre eux, le foyer se formant toujours sur la droite qui passe par le centre et a une direction parallèle au faisceau.

Ces conclusions théoriques ont été vérifiées par les expériences faites avec les *miroirs ardents*. On appelle ainsi des miroirs sphériques concaves disposés de façon à pouvoir diriger leur axe vers le centre du soleil. Si dans ces circonstances on place au foyer des matières diverses, on peut obtenir ou leur fusion ou leur combustion, suivant les dimensions du miroir. Le miroir de Tschirnhausen, construit en 1687, et qui avait deux mètres environ de diamètre, permettait de fondre le cuivre, l'argent, et de vitrifier la brique. Buffon employait, au lieu de miroirs courbes, un système de miroirs plans mobiles, et qu'on amenait dans une position convenable pour que les différents faisceaux réfléchis par eux vinssent se rencontrer dans la même région. Il obtint ainsi des effets extrêmement intenses et put, par exemple, enflammer du bois à une distance de 80 mètres. C'est sans doute par des moyens analogues qu'Archimède parvint à brûler la flotte romaine qui assiégeait Syracuse. Ce fait, si souvent raconté, n'est pas établi historiquement d'une manière certaine ; mais les expériences qui viennent d'être citées prouvent qu'il n'a rien d'absolument invraisemblable.

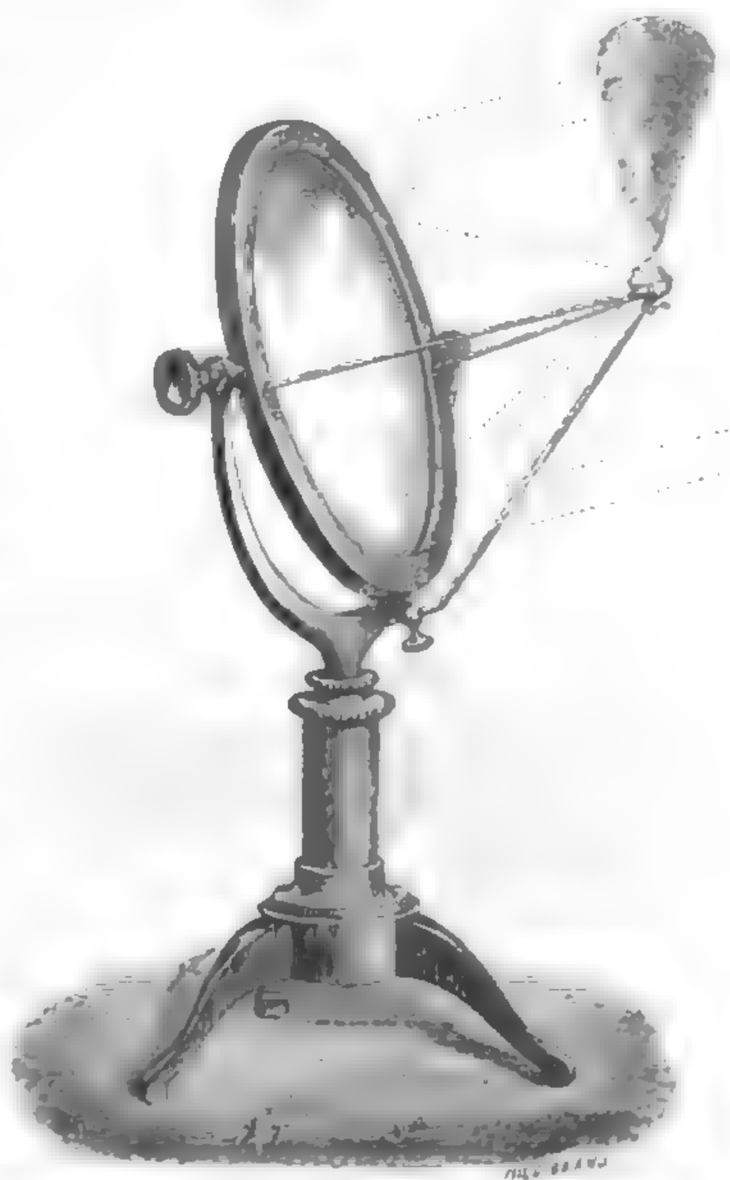


Fig. 282. — Miroir ardent.

311. Miroirs conjugués. — On trouve une démonstration plus

précise des lois de la réflexion de la chaleur dans la célèbre expérience des miroirs conjugués attribuée généralement à Pictet de Genève.

On place en regard l'un de l'autre et à une assez grande distance deux miroirs sphériques dont les axes ont la même direction ; au foyer principal de l'un d'eux on dispose une grille renfermant du charbon allumé, et au foyer de l'autre un corps très-combustible, de l'amadou ou du fulmicoton par exemple. Si à l'aide

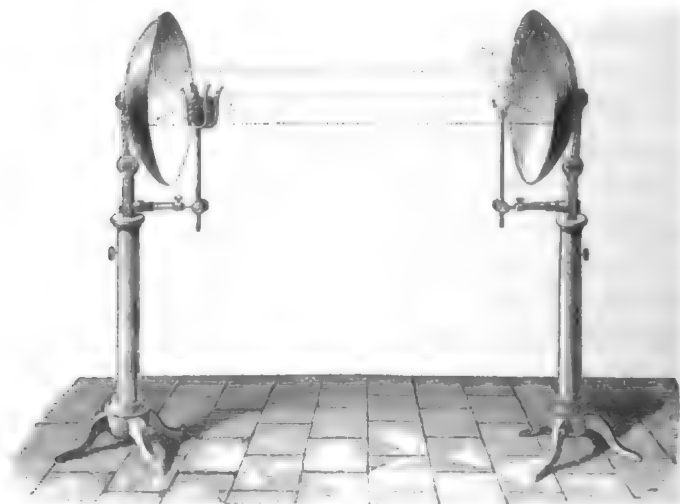


Fig. 283. — Expérience des miroirs conjugués.

d'un soufflet on vient à activer le foyer calorifique, on voit au bout de très-peu de temps l'amadou ou le fulmicoton s'enflammer. Avec des miroirs de 35 centimètres de diamètre, l'expérience réussit aisément à une distance de 10 mètres. Elle s'explique d'ailleurs très-facilement. Les rayons partis du foyer principal où se trouve le corps chaud se réfléchissent parallèlement à l'axe commun des deux miroirs, et viennent après la réflexion sur le second se réfléchir à son foyer, où se trouve le corps combustible.

En voyant le volume considérable du foyer calorifique employé, l'expérience peut paraître très-peu précise ; mais il faut remarquer qu'il n'y a qu'une petite portion de ce foyer qui agisse réellement, les autres parties sont simplement destinées à pro-

duire une température suffisamment élevée dans les points dont l'action est efficace. D'ailleurs l'image lumineuse de la source de chaleur est extrêmement petite, et c'est au point où elle se forme qu'on doit placer le corps combustible. Si on le plaçait à côté, même à une très-petite distance, si on dérangeait tant soit peu l'un ou l'autre des miroirs, l'inflammation n'aurait point lieu. L'expérience doit donc être réglée avec beaucoup de précision pour réussir; elle constitue par conséquent une démonstration suffisamment rigoureuse des lois de la réflexion qui en sont le principe théorique.

312. Différentes propriétés des corps relativement à la chaleur rayonnante. — Si l'on imagine qu'un flux calorifique dont nous supposerons l'intensité égale à 1 vienne à tomber sur un corps, il se divisera en plusieurs parties distinctes :

1° Une portion se réfléchira régulièrement suivant la loi précédemment indiquée; si l'on appelle $\frac{1}{r}$ la fraction de chaleur ainsi réfléchie, la quantité $\frac{1}{r}$ sera la mesure du *pouvoir réflecteur;*

2° Une portion $\frac{1}{d}$ se réfléchira irrégulièrement, se diffusera dans toutes les directions de l'espace. La quantité $\frac{1}{d}$ mesure le *pouvoir diffusif;*

3° Une portion $\frac{1}{a}$ pénétrera dans l'intérieur du corps, sera absorbée par lui, et contribuera à son échauffement. La fraction $\frac{1}{a}$ mesure le *pouvoir absorbant ;*

4° Enfin une quatrième portion $\frac{1}{\delta}$ passera dans beaucoup de cas à travers la substance, sous forme rayonnante, sans contribuer à son échauffement. Cette circonstance ne se présente que dans les corps dits diathermanes, et dans ce cas la fraction $\frac{1}{\delta}$ représente le *pouvoir diathermique.*

Il est évident que la somme des divers faisceaux formés aux dépens du faisceau primitif doit reconstituer ce dernier, de sorte qu'on doit avoir l'égalité

$$\frac{1}{r}+\frac{1}{d}+\frac{1}{a}+\frac{1}{\delta}=1.$$

D'autre part, tout corps porté à une température déterminée devient le centre d'un rayonnement dont l'intensité dépend de la nature de la surface. On doit conclure de ce fait que le flux calorifique qui tend à s'échapper et qui dépend essentiellement de la température est modifié par la surface qui n'en laisse sortir qu'une fraction $\frac{1}{e}$; cette fraction mesure ce que l'on appelle le *pouvoir rayonnant* ou *émissif* de la surface.

Il y a un intérêt évident à connaître la valeur de ces différents pouvoirs dans les corps, ainsi que les circonstances physiques qui peuvent les modifier. D'ailleurs il ne saurait y avoir entre la chaleur rayonnante et les substances naturelles d'autres relations possibles que celles qui viennent d'être indiquées. Nous aurons donc, au point de vue du moins des quantités de chaleur, fait connaître ce qu'il y a de fondamental dans la chaleur rayonnante, si nous indiquons les moyens à l'aide desquels ont été déterminés les différents pouvoirs qui viennent d'être définis.

Abstraction faite de la quantité de chaleur, les rayons calorifiques peuvent éprouver des modifications diverses. Ainsi, en pénétrant dans l'intérieur des corps, ils éprouvent un changement de direction que l'on désigne sous le nom de *réfraction*. Après avoir été réfléchis ou réfractés, ils peuvent être devenus plus ou moins propres à se réfléchir ou se réfracter de nouveau en vertu d'une modification appelée *polarisation*. Cette seconde classe de phénomènes constitue un groupe tout à fait distinct du premier; nous n'en parlerons que dans l'optique, après avoir étudié les propriétés équivalentes dans les rayons lumineux.

313. Appareil thermoscopique employé dans l'étude de la chaleur rayonnante. — L'étude de la chaleur rayonnante ne peut être abordée avec profit qu'à la condition de se servir d'un thermomètre très-sensible. Leslie, vers le commencement de ce siècle, avait imaginé dans ce but le thermomètre différentiel, avec lequel il exécuta des recherches fort importantes et dont les résultats généraux n'ont pas été contredits depuis. Les observateurs modernes, Melloni, Laprovostaye, etc., se sont servis exclusivement du thermomultiplicateur de Nobili, instrument dont la sensibilité est bien supérieure à celle du thermomètre différentiel.

Le thermo-multiplicateur imaginé par Nobili et perfectionné par Melloni a pour organe fondamental une chaîne formée d'éléments alternativement de bismuth et d'antimoine. Si l'on réunit les extrémités de la chaîne par un fil et qu'on chauffe les soudures d'un certain ordre, paires ou impaires, en laissant les autres à la température ordinaire, il se produit un courant thermo-électrique, ainsi que cela sera expliqué plus loin. L'intensité du courant produit augmente d'ailleurs et avec le nombre des éléments et avec la différence de température des soudures.



Fig. 284. — Chaîne thermo-électrique de Nobili.

Dans la disposition imaginée par Melloni, les éléments sont repliés les uns sur les autres de manière à former une masse parallélipipédique (fig. 285) dont une des faces renferme les soudures d'ordre pair, tandis que la face opposée renferme celles d'ordre impair. Le tout est renfermé dans un étui en cuivre, muni à ses extrémités d'opercules destinés à soustraire, quand on le veut, les faces de la pile aux actions extérieures. Les extrémités de la chaîne sont en rapport, par l'intermédiaire de deux tiges métalliques, avec les deux bouts du fil d'un galvanomètre, de sorte que, s'il vient à se produire un courant, le galvanomètre en décèlera la présence. Une table, dont nous indiquerons la construction plus tard, fait connaître l'intensité du courant correspondante aux diverses déviations galvanométriques. Il suit de là que si un rayon calorifique vient à frapper l'une des faces de la pile, il se produira un courant dont l'intensité sera donnée par le galvanomètre. Nous verrons plus tard, à propos des courants thermo-électriques, que dans de certaines limites, qui ne sont jamais dépassées d'ailleurs dans les recherches sur la chaleur rayonnante, l'intensité du courant est proportionnelle à la différence de température des soudures. Lors donc que la pile thermoscopique aura atteint son équilibre sous l'influence du flux calorifique qui la frappe, elle recevra à chaque instant une quantité de chaleur égale à celle qu'elle perd par le rayonnement; mais cette dernière étant, d'après la loi de

Newton, proportionnelle à l'excès de la température sur celle de l'air ambiant, c'est-à-dire à la différence de température des soudures, il s'ensuit que l'indication thermoscopique, c'est-à-dire l'intensité du courant produit, est proportionnelle à la quantité

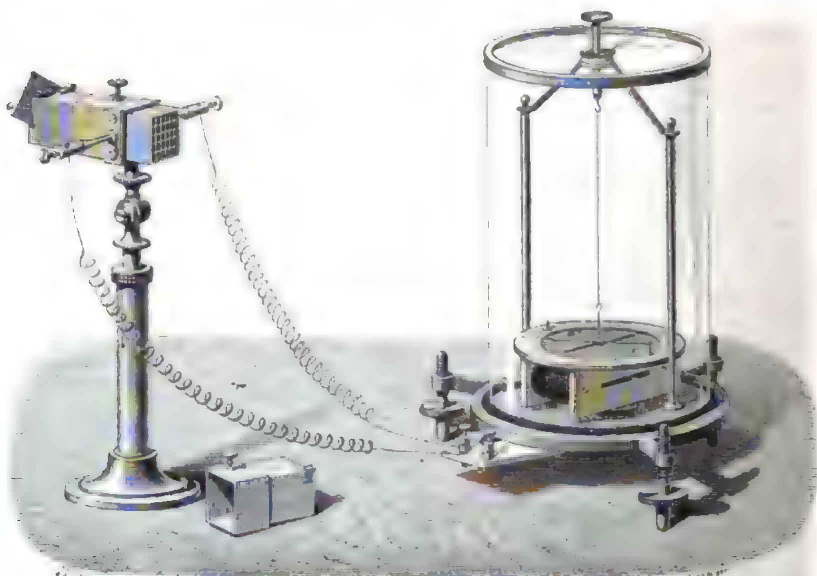


Fig. 285. — Thermo-multiplicateur de Melloni.

de chaleur reçue par l'instrument. On a donc dans l'instrument de Nobili un thermomètre d'une sensibilité très-grande et qui est d'ailleurs parfaitement approprié à l'étude de la chaleur rayonnante; c'est grâce à lui que les savants cités plus haut ont pu amener cette partie de la physique à un degré remarquable d'avancement.

314. Mesure du pouvoir émissif. — Pour mesurer le pouvoir émissif, Melloni disposait l'expérience comme il suit : Sur une règle métallique divisée (fig. 286) est placé un cube dont les diverses faces sont recouvertes de substances différentes. Ce cube contient de l'eau qu'on entretient en ébullition à l'aide d'une lampe à alcool placée dans la partie creuse du support. A une certaine distance est placée la pile, et des écrans intermédiaires permettent d'arrêter quand on le veut le rayonnement.

L'ensemble de la règle, des supports destinés à soutenir la pile, des écrans, etc., forme ce que l'on appelle l'*appareil de Melloni*.

Si l'on fait rayonner successivement vers la pile les diverses faces du cube, on obtiendra des courants dont les intensités dans

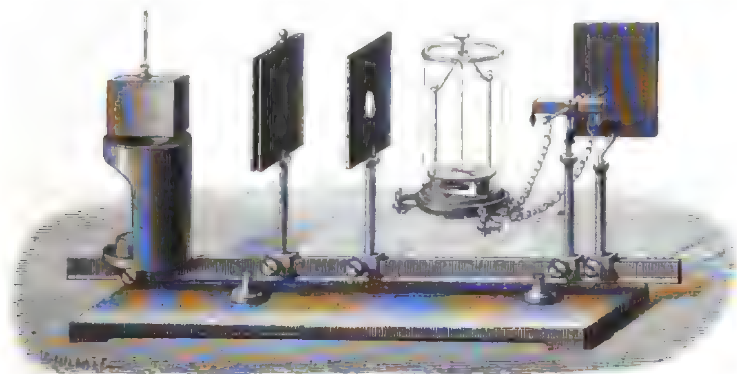


Fig. 286. — Mesure du pouvoir émissif.

l'état d'équilibre seront précisément la mesure des pouvoirs émissifs des substances qui recouvrent les faces du cube.

A l'aide d'expériences de cette nature appliquées à diverses substances, on a reconnu que le noir de fumée est le corps dont le pouvoir rayonnant est le plus considérable, tandis que les métaux ont le pouvoir le plus faible. Le tableau suivant indique les résultats les plus importants; tous les pouvoirs émissifs sont comparés à celui du noir de fumée, qu'on a représenté par 100 :

POUVOIRS ÉMISSIFS.

Noir de fumée.	100	Acier.	17
Blanc de céruse.	100	Platine	17
Papier	98	Laiton poli.	7
Verre.	90	Cuivre rouge.	7
Encre de Chine.	85	Or poli.	3
Gomme laque	72	Argent poli.	3

315. Circonstances qui influent sur le pouvoir émissif. — Le pouvoir émissif résulte d'une action propre de la surface, car les résultats obtenus sont tout à fait indépendants de la nature inté-

rieure du corps rayonnant. Toutefois par ce mot de surface il ne faut pas entendre une sorte de surface mathématique, mais bien une couche d'une certaine épaisseur; c'est ce que montre très-nettement l'expérience suivante : On recouvre l'une des faces du cube de plusieurs couches de vernis, à chaque addition nouvelle il se produit une variation dans le pouvoir émissif; mais cela ne s'observe que jusqu'à une certaine limite : à partir d'une certaine épaisseur, qui est d'ailleurs très-petite, le pouvoir émissif reste constant.

C'est donc dans une petite épaisseur de la surface d'un corps que se produit le mouvement calorifique susceptible de se transmettre au dehors par voie de rayonnement. L'expérience montre que, toutes choses égales d'ailleurs, ce rayonnement est d'autant plus intense que la densité de cette couche superficielle est plus petite. Ainsi les opérations qui auront pour résultat de diminuer ou d'augmenter cette densité produiront un effet inverse sur le pouvoir rayonnant. Par exemple, si l'on prend une plaque d'argent ou de cuivre fondu et qu'on la raye, le pouvoir émissif diminue, car cette opération a comprimé le métal et augmenté ainsi la densité moyenne de la couche superficielle. S'il s'agit, au contraire, d'une plaque écrouie, l'action de rayer a pour résultat de mettre en évidence les couches inférieures dont la densité est plus faible; la densité moyenne superficielle diminue donc, et l'on observe que le pouvoir rayonnant augmente.

En général, les couleurs sombres paraissent avoir un pouvoir rayonnant plus grand que les couleurs claires; toutefois cela n'est pas absolument général, car on voit dans le tableau précédent que le pouvoir émissif du blanc de céruse est égal à celui du noir de fumée.

Enfin le pouvoir émissif change sensiblement avec la température. Laprovostaye et Desains ont établi ce fait en se servant, comme corps rayonnant, d'une lame de platine que l'on pouvait porter à une température de 5 à 600° par l'action d'un courant électrique. La lame rayonnait sur deux thermo-multiplicateurs différents par ses deux faces opposées; l'une d'elles était recouverte de noir de fumée, l'autre d'une substance quelconque. Le rapport des indications thermoscopiques donne aux diverses températures le rapport

des pouvoirs émissifs des deux substances, et on trouve que ce rapport est généralement variable, mais pas toujours dans le même sens. Ainsi le borate de plomb, qui à 100° a à peu près le même pouvoir émissif que le noir de fumée, à 500° a un pouvoir qui n'en est que les 0,75. Le pouvoir émissif du platine, au contraire, qui à 100° est le 0,1 de celui du noir de fumée, à 500° en est les 0,14.

316. Pouvoir absorbant. — Le moyen qui se présente le plus naturellement à l'esprit pour étudier le pouvoir absorbant consis-

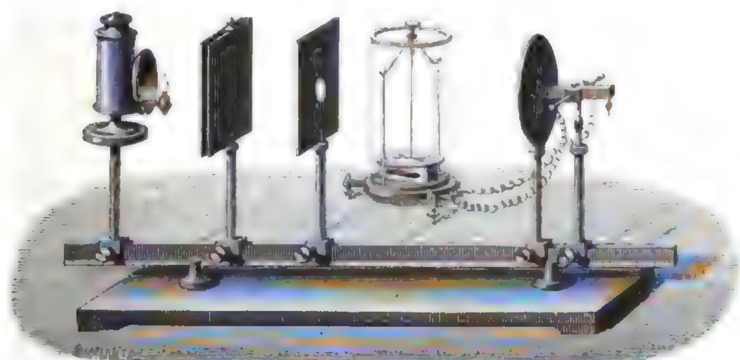


Fig. 287. — Mesure du pouvoir absorbant.

terait à recouvrir de substances diverses la face de la pile exposée au rayonnement et à observer les indications correspondantes. Mais ce procédé a l'inconvénient grave d'altérer continuellement la pile, qui est un appareil fort délicat et qu'il convient, au contraire, de soustraire le plus soigneusement possible à toutes chances d'altération. Melloni employait le procédé suivant : Il plaçait au-devant de la pile un disque très-mince, recouvert du côté de la pile de noir de fumée, et du côté de la source de la substance dont on voulait étudier le pouvoir absorbant. Sous l'influence du rayonnement, le disque s'échauffait et rayonnait lui-même vers la pile en raison de la quantité de chaleur qu'il avait absorbée. Les indications thermoscopiques, au moment de l'équilibre, sont donc en rapport avec le pouvoir absorbant, mais elles n'en sont pas la mesure proportionnelle, parce que, d'une expérience à l'autre, la surface du disque change, et, par suite, la proportion de chaleur qu'il

perd, chaleur qui est égale à celle qu'il reçoit en vertu du pouvoir absorbant de la substance étudiée, change également.

Voici le tableau de quelques-uns des résultats obtenus en prenant pour source de chaleur le cube chauffé à 100° :

Noir de fumée.	100	Encre de Chine.	85
Céruse.	100	Gomme laque.	72
Colle de poisson.	91	Métaux.	13

On voit que ces nombres sont les mêmes que ceux qui représentent les pouvoirs émissifs des mêmes substances. Ce résultat est assez naturel, car l'émission et l'absorption sont deux phénomènes de même nature. Dans l'un et l'autre se trouve la modification imprimée par la surface du corps à un flux de chaleur qui tend à pénétrer dans le corps ou à en sortir.

317. Influence de la nature de la source. — Le pouvoir absorbant varie avec la nature de la source qui rayonne vers le corps. Melloni a employé, pour vérifier ce fait important, les sources de chaleur suivantes :

1° La lampe de Locatelli, petite lampe à niveau constant, dont la mèche est pleine et a une forme parallélipipédique. C'est une source de chaleur douée d'une assez grande constance; c'est avec elle qu'ont été exécutées la plupart des expériences sur la diathermanéité; elle est représentée dans la figure 287.

2° Le platine incandescent; c'est une spirale de platine que l'on suspend au-dessus d'une lampe à alcool (fig. 288) de façon à envelopper, pour ainsi dire, la flamme; le métal rougit fortement, et c'est à lui à peu près exclusivement qu'est dû le rayonnement, la flamme, qui est à peine visible d'ailleurs, ayant un pouvoir rayonnant très-faible.

3° Le cuivre chauffé à 400° environ; on emploie pour obtenir cette source une lame de cuivre recourbée (fig. 289) derrière laquelle on dispose une lampe à alcool.

4° Le cuivre enfumé chauffé à 100°. C'est un cube (fig. 290) contenant de l'eau bouillante, semblable à celui qui sert dans la mesure des pouvoirs émissifs; on se sert de la face recouverte de noir de fumée.

En répétant avec ces diverses sources l'expérience qui sert à mesurer le pouvoir absorbant, on trouve que ce pouvoir est très-variable avec la nature de la source; et qu'en général il augmente à mesure que la température de la source est moins élevée. Pour con-



Fig. 288. — Platine incandescent.

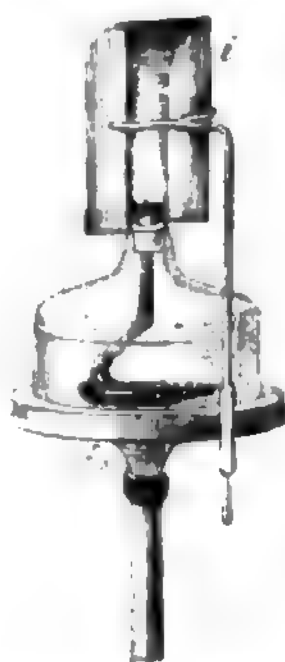


Fig. 289. — Cuivre chauffé à 100°.

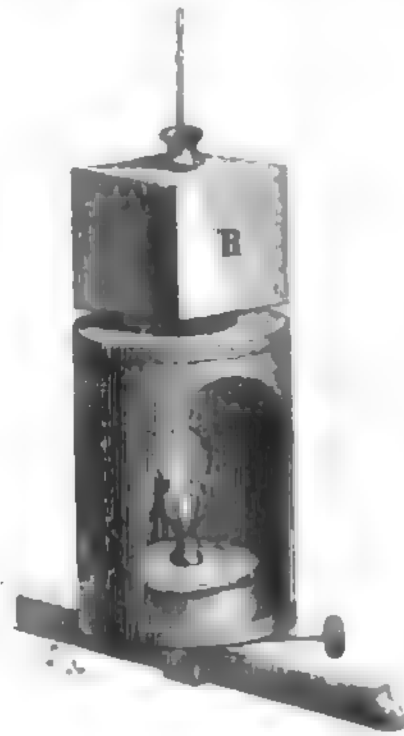


Fig. 290. — Cube chauffé à 100°.

stater ce fait important, il faut se mettre à l'abri de l'effet résultant des différences d'intensité des diverses sources; car il serait tout simple que le disque soumis à l'expérience s'échauffât davantage sous l'action de la lampe de Locatelli que sous celle du cuivre à 100°. Pour cela, on place les diverses sources à des distances telles que le rayonnement direct sur la pile ait la même valeur, et c'est dans ces positions pour lesquelles elles envoient le même flux calorifique à la pile, qu'on les fait rayonner sur le disque. Le tableau suivant renferme quelques-uns des résultats obtenus par Melloni.

SUBSTANCES.	LAMPE de LOCATELLI.	PLATINE INCANDESCENT.	CUIVRE CHAUFFÉ.	CUBE à 100 DEGRÉS.
Noir de fumée. . .	100	100	100	100
Encre de Chine. . .	96	95	87	85
Céruse..	53	56	89	100
Colle de poisson. .	52	54	64	91
Gomme laque.. . .	48	47	70	72
Surface métallique..	14	13,5	13	13

On voit qu'à l'exception de ce qui a lieu pour l'encre de Chine, les rayons à basse température sont beaucoup plus absorbables que les rayons à température élevée. Cette observation permet de se rendre compte de quelques faits connus. Ainsi, par exemple, on a reconnu depuis longtemps que la neige fond plus vite dans le voisinage des arbres qu'à une distance un peu grande. Cela tient à ce que les branches, échauffées par le soleil, constituent une source de radiations obscures à basse température et par suite beaucoup plus absorbables que les rayons directs du soleil. Melloni a confirmé directement la réalité de cette explication : il plaçait une lampe Locatelli et du cuivre chauffé à une distance de la pile telle que l'effet galvanométrique fût le même ; les deux flux calorifiques avaient donc la même intensité. En remplaçant la pile par une auge contenant de la neige, il constata que celle-ci fondait beaucoup plus vite par l'action du cuivre que par celle de la lampe.

318. Égalité des pouvoirs émissifs et absorbants. — Ainsi que nous l'avons déjà remarqué, les corps qui rayonnent le plus facilement sont aussi ceux qui absorbent le mieux la chaleur ; toutes les circonstances qui font varier dans un certain sens le pouvoir émissif font varier dans le même sens le pouvoir absorbant ; il est donc naturel de penser que ces deux facultés des corps sont tout à fait identiques, c'est-à-dire que le pouvoir émissif est égal au pouvoir absorbant. On peut d'ailleurs conclure rigoureusement cette égalité de l'expérience suivante de Dulong :

Ayant placé un thermomètre dans un ballon à surface intérieure noircie, il observa le temps qu'il mettait à se refroidir d'un petit nombre de degrés, lorsque sa température est supérieure à celle de l'enceinte de 10° par exemple. Il observa de même le temps qu'il employait à se réchauffer de la même quantité, lorsque la température de l'enceinte est supérieure du même nombre de degrés. Il trouva que ces temps étaient exactement égaux, et il serait à coup sûr impossible d'interpréter un résultat pareil, s'il y avait entre les facultés d'émission et d'absorption de la surface du thermomètre une différence sensible.

Il importe toutefois de ne pas se méprendre sur le sens de cette égalité. Elle ne peut s'appliquer évidemment qu'à des rayons calori-

fiques de même nature. Ainsi, par exemple, on ne peut, en aucune façon, comparer le pouvoir émissif du carbonate de plomb chauffé à 100° avec son pouvoir absorbant pour les rayons solaires.

La mesure des pouvoirs émissifs à des températures élevées est assez limitée, de sorte que l'égalité, à toute température des pouvoirs émissifs et absorbants pour la chaleur, constitue plutôt une conception théorique qu'une vérité expérimentale.

319. Pouvoir réflecteur. — Le pouvoir réflecteur d'un corps est mesuré par la proportion de la chaleur incidente que la surface de ce corps réfléchit régulièrement. Melloni, d'une part,

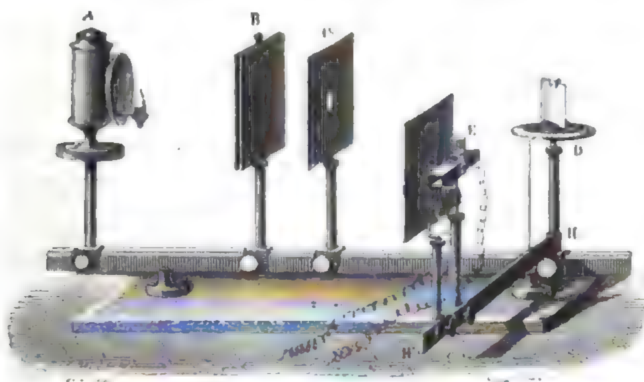


Fig. 291. — Mesure du pouvoir réflecteur.

MM. Laprovostaye et Desains, de l'autre, ont étudié les pouvoirs réflecteurs en disposant le thermo-multiplicateur comme l'indique la figure 291.

En un point H de la règle de l'appareil, se trouve un support portant une plate-forme circulaire divisée D. Une seconde règle D' mobile, à charnière autour de l'axe même du support, porte l'appareil thermoscopique E.

Sur le support on place une plaque de la substance à étudier, et on dirige la règle mobile de façon que les rayons émis par la lampe, après leur réflexion sur la plaque, viennent aboutir à l'ouverture de la pile; la division tracée sur la plate-forme permet d'obtenir facilement ce résultat.

Pour faire une observation, on commence par placer la règle D'

sur le prolongement de la règle principale, et on observe ainsi l'intensité de la radiation directe. On place ensuite la pile sur le trajet du faisceau réfléchi, et le rapport de l'intensité obtenue dans ce cas à celle que produit le faisceau direct donne la mesure du pouvoir réflecteur.

Voici quelques nombres empruntés aux recherches de MM. Laprovostaye et Desains; la source de chaleur employée était une lampe de Locatelli :

	POUVOIR réflecteur.		POUVOIR réflecteur.
Plaqué d'argent	0,97	Platine poli	0,80
Or	0,95	Acier	0,83
Laiton	0,93	Zinc	0,81
Métal des miroirs	0,86	Fer	0,77
Étain	0,85		

Les mêmes observateurs ont constaté que, dans le cas des substances diathermanes, le pouvoir réflecteur varie notablement avec l'incidence, ainsi que cela arrive pour les rayons lumineux.

Pour les métaux cette influence de l'incidence est beaucoup moindre; ainsi le pouvoir réflecteur reste à peu près constant jusqu'à 70 ou 80°; pour une incidence plus grande, il diminue contrairement à ce qui a lieu pour les substances transparentes.

Enfin MM. Laprovostaye et Desains ont constaté, contrairement à ce qu'on avait cru jusque-là, que le pouvoir réflecteur varie avec la nature de la source. Ainsi, le pouvoir réflecteur de l'argent poli, qui est de 0,97 pour les rayons de la lampe de Locatelli, tombe à 0,92 pour les rayons solaires. On voit que dans tous les cas le pouvoir réflecteur de l'argent poli est extrêmement considérable; comme il résulte d'ailleurs d'expériences comparatives très-nombreuses, que dans les radiations à la fois lumineuses et calorifiques la chaleur et la lumière se réfléchissent en égale proportion, on comprend tout l'avantage que présentent les miroirs argentés employés depuis quelque temps dans la construction des télescopes.

320. Pouvoir diffusif. — La diffusion est la réflexion irrégulière de la chaleur, produite sans doute par la multitude des aspérités qui se rencontrent à la surface des corps les plus polis. On

peut très-aisément constater la réalité de la diffusion. Il suffit de faire tomber un faisceau calorifique sur une plaque d'une matière mate, telle que du carbonate de plomb par exemple. En plaçant la pile au-devant de la plaque et dans une position quelconque, on observe une déviation du galvanomètre. Il est impossible d'attribuer l'effet produit à l'échauffement de la plaque elle-même; car, d'une part, cet effet est instantané et atteint immédiatement son maximum, tandis que s'il provenait de l'échauffement il faudrait pour cela un temps assez considérable. D'ailleurs on peut interposer sur le trajet de la chaleur diffusée une lame diathermane capable d'arrêter presque complétement les rayons à basse température, une lame d'alun par exemple; il n'en résulte qu'une faible diminution dans l'indication de la pile, tandis qu'il en serait tout autrement si cette indication avait pour origine l'échauffement de la plaque diffusante.

Le pouvoir diffusif des matières mates, surtout quand elles sont blanches, est extrêmement considérable, comme le prouve le tableau suivant, emprunté aux recherches de MM. Laprovostaye et Desains :

POUVOIR DIFFUSIF.

Céruse.	0,82
Poudre d'argent.	0,76
Chromate de plomb.	0,66

On se rend compte ainsi de l'intensité de la chaleur que l'on éprouve dans le voisinage d'un mur blanc éclairé par le soleil, bien qu'on soit à l'abri des radiations directes. Cette diffusion se fait d'ailleurs en proportions variables suivant la direction, et c'est dans le voisinage du faisceau, régulièrement réfléchi, que cette proportion est la plus considérable.

L'intensité du faisceau diffusé varie très-notablement avec la nature de la source, et c'est là une analogie très-réelle avec la diffusion de la lumière. Melloni mettait le fait en évidence de la manière suivante :

Il faisait tomber un faiseau de chaleur sur une matière diffusante étalée à la surface d'un disque de carton très-mince; sur la

face opposée du carton était étendue une couche de noir de fumée. Lorsque l'équilibre de température était établi, on plaçait la pile successivement en avant de la plaque diffusante et en arrière du côté du noir de fumée, dans une position symétrique. On obtenait ainsi deux indications très-différentes. La première provenait, en effet, et de la diffusion de la chaleur, et de son émission par la plaque échauffée; la seconde avait pour origine l'émission seulement. Or on constate que le rapport de ces deux indications est très-différent suivant qu'on emploie une source ou une autre; en général la diffusion est proportionnellement beaucoup plus forte pour les radiations lumineuses et à température élevée.

321. Propriété particulière du noir de fumée. — Quand on fait l'expérience précédente en recouvrant les deux faces du disque de noir de fumée, on trouve qu'il y a une très-petite différence entre les effets des radiations de la face postérieure ou antérieure du disque. Cette différence doit être attribuée naturellement au léger abaissement de température produit par l'épaisseur du disque. On peut donc conclure que la totalité de la chaleur a été absorbée par le noir de fumée. Ce résultat important est confirmé par des expériences directes dans lesquelles il a été impossible de constater la moindre trace de pouvoir réflecteur ou diffusif dans cette substance. D'ailleurs les rapports des deux effets restent constants quand on emploie une source ou une autre; d'où on voit que l'absorption des radiations calorifiques par le noir de fumée est dans tous les cas indépendante de la nature de la source.

Cette propriété intéressante justifie la pratique constante qui consiste à recouvrir les appareils thermoscopiques de noir de fumée; on augmente ainsi leur sensibilité sans nuire à leur exactitude, puisque l'absorption est indépendante de la nature de la source.

322. Pouvoir diathermique. — La diathermanéité, c'est-à-dire la propriété qu'ont certaines substances de se laisser traverser par la chaleur rayonnante, n'a été constatée d'une manière explicite qu'à une époque relativement récente. On admettait bien le passage à travers le verre, par exemple, des radiations très-lumineuses comme celles du soleil, mais on ne supposait pas qu'il pût en être de même

pour les sources obscures ou même peu éclairantes. C'est ainsi qu'on expliquait l'habitude qu'ont les ouvriers des fonderies, pour garantir leurs yeux de l'action trop vive des foyers, de regarder la matière en fusion à travers une lame de verre.

Pictet, de Genève, constata le premier l'élévation de température d'un thermomètre séparé de la source de chaleur par une lame transparente; mais on pouvait objecter que l'effet observé provenait de l'échauffement de la lame. Prévost leva cette objection d'une manière radicale : il fit couler entre la source et le thermomètre une nappe d'eau, ou bien il interposa une plaque de glace (eau solide); ici l'échauffement était impossible, et pourtant l'élévation de température du thermomètre se produisit également. Delaroche, en tenant le fait pour démontré, s'attacha à en varier les conditions et fut conduit à des lois remarquables.

Toutefois c'est à Melloni que la science est redevable des principaux résultats qui se rapportent à cette partie de la physique. C'est grâce à la pile thermoscopique qu'il a pu apporter dans ce sujet délicat une précision qui semblait pour ainsi dire impossible à réaliser, et les savants qui, après lui, ont étendu un peu ses découvertes, ont fait exclusivement usage de ce précieux instrument. Bien que les travaux si importants de Laprovostaye et Desains aient eu pour résultat d'apporter quelques restrictions dans les propositions formulées autrefois par Melloni, on peut dire que dans leur ensemble elles doivent être maintenues : nous allons faire connaître sommairement les plus importantes.

323. Influence de la nature de la substance. — Pour étudier la diathermanéité ou le pouvoir diathermique d'une substance solide, Melloni disposait l'expérience comme l'indique la figure 292. La lampe de Locatelli A peut rayonner vers la pile E quand on abaisse l'écran B; l'écran C est percé d'une ouverture qui est destinée à limiter le faisceau calorifique. On commence par observer le rayonnement direct, on note la déviation du galvanomètre G et l'intensité correspondante du courant. On interpose ensuite sur le trajet du faisceau la plaque diathermane D et on mesure la nouvelle intensité du courant; le rapport de cette intensité à la première est l'expression du pouvoir diathermique.

Pour les liquides, Melloni employait de petites auges dont les faces perpendiculaires au faisceau étaient formées par des lames très-minces de verre; on observait le passage du faisceau d'abord

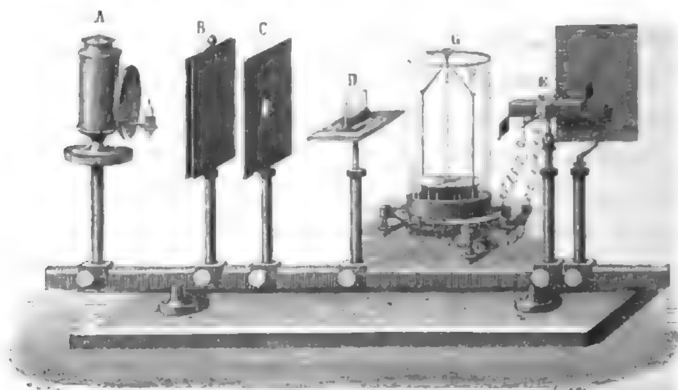


Fig. 202. — Mesure du pouvoir diathermique.

à travers l'auge vide, puis à travers l'auge pleine; la différence des deux effets mesurait l'action propre du liquide. Voici le tableau des principaux résultats :

CHALEURS TRANSMISES PAR QUELQUES SUBSTANCES

AVEC LA LAMPE D'ARGAND.

(La chaleur directe est représentée par 100.)

SUBSTANCES SOLIDES.

Verres incolores.

(Épaisseur $1^{mm},88$.)

Flint	de 67 à 64
Verre de glace	de 62 à 59
Crown français	58
— anglais	49
Verre à vitre	de 54 à 50

Verres colorés.

(Épaisseur $1^{mm},85$.)

Violet foncé	53
— pâle	45
Bleu très-foncé	19
— foncé	33
— clair	42

SUBSTANCES LIQUIDES.

(Épaisseur $9^{mm},21$. — Une lame de glace de même épaisseur donne 53.)

Liquides incolores.

Eau distillée	11
Alcool absolu	15
Éther sulfurique	21
Sulfure de carbone	63
Essence de térébenthine	31
Acide sulfurique pur	17
— nitrique pur	15
Dissolution de sel marin	12
— d'alun	12
— de sucre	12
— de potasse	13
— d'ammoniaque	15

SUBSTANCES SOLIDES.		SUBSTANCES LIQUIDES.	
Verres colorés.		*Liquides colorés.*	
Vert minéral	23	Huile de noix (jaune)	31
— pomme	26	— de colza (jaune)	30
Jaune foncé	40	— d'olive (jaune verdâtre)	30
Orangé rouge	44	— d'œillette (jaunâtre)	26
Rouge jaunâtre	53	Chlorure de soufre (rouge-brun)	63
— pourpre	51	Acide pyroligneux (brun)	12
		Blanc d'œuf (légèrement jaune)	11

CORPS CRISTALLISÉS.

(Épaisseur $3^{mm},62$. — Un verre de glace d'égale épaisseur donne 62.)

INCOLORES.		COLORÉS.	
Sel gemme	0,92	Cristal de roche enfumé (brun)	57
Spath d'Islande	0,12	Aigue-marine (légèrement bleue)	29
Cristal de roche	0,57	Agate jaune	29
Topaze du Brésil	0,54	Tourmaline verte	27
Carbonate de plomb	0,52	Sulfate de cuivre (bleu)	0
Borate de soude	0,28		
Sulfate de chaux	0,20		
Acide citrique	0,15		
Alun de roche	0,12		

On voit à l'inspection de ce tableau que la diathermanéité se rencontre exclusivement dans les corps diaphanes, c'est-à-dire que la transparence pour la chaleur et la transparence pour la lumière paraissent exister simultanément. Toutefois ces deux propriétés ne sont pas absolument corrélatives; ainsi ce ne sont pas les corps les plus diaphanes qui sont les plus diathermanes. On voit, par exemple, que l'acide acétique incolore est beaucoup moins diathermane que le chlorure de soufre fortement coloré; l'alun parfaitement limpide laisse passer beaucoup moins de chaleur que des verres très-fortement teintés, de même épaisseur. La diathermanéité, tout en étant associée à la diaphanéité, est donc une propriété propre.

La substance qui offre le plus grand pouvoir diathermique est le sel gemme; il laisse passer les 0,92 de la chaleur incidente. Le sel marin ordinaire n'en laisse passer que les 0,12. La dissolution de l'une ou de l'autre substance offre le même pouvoir.

Dans ces dernières années, M. Tyndall a constaté que l'air

chargé de vapeur d'eau est très-sensiblement moins diathermane que l'air sec. A cet effet, il fait passer un faisceau calorifique dans un tube contenant de l'air sec : l'aiguille du galvanomètre se dévie d'une certaine quantité. A l'aide d'une source de chaleur agissant en sens contraire, on ramène l'aiguille au zéro. On fait alors arriver de la vapeur d'eau ou de l'air humide, et l'aiguille continue sa marche rétrograde, de manière à accuser une diminution de chaleur transmise. C'est grâce à la vapeur d'eau, que l'atmosphère renferme toujours, que les rayons solaires directs sont notablement affaiblis; à travers l'air sec, ou mieux encore à travers le vide, la chaleur transmise par eux serait excessive.

324. Influence de l'épaisseur. — Lorsqu'on fait traverser à un faisceau de chaleur des plaques d'un corps diathermane de plus en plus épaisses, l'intensité de la chaleur transmise est de plus en plus petite. Ce résultat est naturel; il n'y a pas en effet de diathermanéité absolue, il y a toujours une partie de la chaleur qui est absorbée suivant une proportion plus ou moins forte, et dès lors il est évident que cette absorption doit croître avec l'épaisseur.

Une substance toutefois fait exception à cette règle, c'est le sel gemme. Quelle que soit l'épaisseur sur laquelle on ait expérimenté, il a toujours passé les 0,92 de la chaleur incidente. On ne peut pas affirmer qu'il en serait ainsi pour des épaisseurs extrêmement grandes; mais en restant dans les limites des expériences faites, on doit en conclure que le sel gemme ne produit aucune absorption. Les 0,08 de perte qu'éprouve le faisceau ne peuvent donc être attribués qu'à la réflexion qui se produit sur les deux faces de la plaque.

Si, après qu'un faisceau de chaleur a traversé une plaque diathermane d'une certaine épaisseur, on le reçoit sur une plaque identiqué, on constate que la perte qu'il éprouve est moins considérable; la perte serait plus petite encore dans le passage à travers une troisième, une quatrième plaque, etc. Ce fait important, découvert par Delaroche et confirmé par Melloni, constitue la loi *du décroissement des pertes*. Il ne peut s'expliquer qu'en admettant que tout faisceau de chaleur est formé par la réunion de différents faisceaux élémentaires et inégalement absorbables. Dès lors, à mesure

que l'épaisseur traversée augmente, le faisceau initial s'épure pour ainsi dire, les éléments les plus absorbables sont bientôt réduits à une très-faible intensité, et il ne reste de plus en plus que ceux dont la transmission est la plus facile.

325. Influence de la nature de la source. — Cette hétérogénéité des flux de chaleur est accusée directement par la formation du spectre calorifique qui, comme nous le verrons plus tard, s'étend même au delà du spectre lumineux. Les rayons élémentaires de chaleur diffèrent donc les uns des autres comme les rayons de lumière par leur réfrangibilité; à chaque réfrangibilité correspond une faculté d'absorption différente. C'est une sorte de coloration calorifique, que Melloni a désignée sous le nom de *diathermansie*. On doit conclure de là que les diverses sources de chaleur doivent donner lieu à des spectres différents, et par suite doivent former des faisceaux inégalement absorbables; c'est ce que l'expérience confirme de la manière la plus nette. On emploie à cet effet les sources calorifiques qui ont été indiquées plus haut (317), et on les place à une distance de la pile telle que la radiation directe ait la même intensité. On interpose ensuite sur le trajet des faisceaux des corps diathermanes et on remarque que la proportion de chaleur transmise est différente d'une source à l'autre; en général, elle est d'autant plus forte que la température de la source est plus élevée.

Le sel gemme fait exception, comme on devait le prévoir; quelle que soit la source, il laisse toujours passer les 0,92 de la chaleur incidente.

Une exception d'un autre genre se rencontre dans le sel gemme, légèrement enfumé, qui laisse passer plus facilement les rayons à basse température que les rayons à température élevée; c'est jusqu'à présent la seule substance connue qui présente ce caractère.

La transmission difficile des rayons à basse température explique comment la température peut s'élever si haut dans un vase fermé par une lame de verre et exposé au soleil. Les rayons solaires traversent facilement le verre, échauffent l'intérieur et donnent lieu à des rayons obscurs difficilement transmissibles. C'est pour cette

cause que les appartements fermés par des vitres exposées au soleil s'échauffent si rapidement.

C'est là aussi une des raisons, du moins, de l'infidélité des indications d'un thermomètre placé au soleil. En été, dans nos climats, un thermomètre peut accuser au soleil une température supérieure à 50°; ce n'est pas là du tout la température du point où l'instrument se trouve, c'est celle qu'acquiert le mercure par l'action du verre qui l'enveloppe.

Quelque chose d'analogue est produit par la vapeur d'eau atmosphérique; elle atténue, comme nous l'avons dit plus haut, les effets de la radiation solaire; mais elle atténue aussi les effets du refroidissement en retenant dans l'atmosphère la chaleur, qui sans cela se serait perdue dans les espaces planétaires.

326. Identité de la chaleur et de la lumière. — Les phénomènes qui viennent d'être décrits accusent à la fois une analogie très-grande dans les modifications qu'éprouvent les radiations calorifiques et les radiations lumineuses, et une sorte d'indépendance entre ces deux radiations qui, mal interprétée, pourrait conduire à des conclusions erronées. On se tromperait en effet complétement si on imaginait que ces deux sortes de radiations sont analogues, mais *distinctes*; qu'il y a, par exemple, dans un rayon solaire, une partie lumineuse et une partie calorifique superposées, mais constituant au fond deux choses différentes; c'est le contraire qui est la vérité. Si en effet on décompose, comme l'ont fait MM. Masson et Jamin, un faisceau de chaleur par un prisme de sel gemme, on obtient un spectre qui se compose de deux parties : l'une lumineuse et calorifique, l'autre calorifique et obscure qui s'étend au delà du rouge. Si l'on considère les rayons *simples* de la partie lumineuse, on trouve que la lumière et la chaleur en sont absorbées parallèlement par les corps diathermanes colorés, qu'elles diminuent et s'éteignent ensemble. Les vibrations qui produisent la partie lumineuse sont donc susceptibles d'agir à la fois et sur le sens du toucher et sur la rétine, de même qu'une vibration sonore, perçue par l'oreille, peut également être sentie par la main; mais ce n'en est pas moins une vibration unique. Quant à la partie obscure du spectre, son absence d'action sur la rétine tient peut-être à ce que

les rayons peu réfrangibles qui la forment sont absorbables par l'eau, et par suite par les humeurs de l'œil, et ne peuvent par conséquent impressionner la rétine.

Il est curieux de remarquer d'ailleurs que ces vibrations obscures peuvent engendrer des vibrations lumineuses, de même que ces dernières, en se communiquant aux corps pour les échauffer, engendrent des vibrations obscures. Cela résulte de l'expérience suivante de M. Tyndall. On fait passer un faisceau de lumière solaire à travers une cuve contenant une dissolution d'iode dans le sulfure de carbone; *tous les rayons lumineux* sont absorbés, et il n'émerge que de la chaleur obscure. On concentre celle-ci à l'aide d'un miroir parabolique et on place un corps combustible à son foyer; à l'aide de la chaleur obscure qui s'y trouve, le corps peut s'enflammer en régénérant ainsi de la chaleur lumineuse.

327. Rosée. — On donne le nom de *rosée* aux gouttelettes d'eau que l'on aperçoit le matin à la surface des plantes, et qui sont surtout abondantes après les nuits de printemps et d'automne. La rosée ne tombe point (298); ce n'est point de l'eau formée dans l'atmosphère, c'est au contact même des corps, et par suite de leur refroidissement, qu'elle se produit. En effet, lorsque le soleil a quitté l'horizon, les corps, cessant de recevoir de la chaleur de cet astre, rayonnent vers l'espace plus de chaleur qu'ils n'en reçoivent, et leur température s'abaisse. Les effets de ce rayonnement nocturne sont d'ailleurs plus marqués pour les corps qui forment la surface du sol, l'herbe, les débris végétaux, etc., que pour l'air, qui a un pouvoir rayonnant moindre. Il résulte de cette circonstance que, pendant la nuit, non-seulement la surface du sol se refroidit, mais qu'elle se refroidit notablement au-dessous de l'air ambiant. Cette différence de température a été pleinement vérifiée par l'expérience, elle peut atteindre 8 à 10°, et c'est là précisément la cause de la rosée. En effet, le refroidissement graduel des corps amène par communication celui des couches d'air ambiant; la saturation peut donc se produire, et un nouveau progrès du refroidissement détermine la condensation de la vapeur. Si le refroidissement nocturne du sol atteint et dépasse zéro, la rosée se congèle, c'est le *givre* ou la *gelée blanche*.

D'après cette théorie, aussi simple que rigoureuse, on voit qu'un corps devra se couvrir d'une quantité de rosée d'autant plus considérable que son pouvoir émissif est plus grand ; c'est ce que l'expérience confirme.

Le genre d'exposition a aussi une grande influence ; si le corps est abrité plus ou moins complétement, l'échange par rayonnement vers les parties supérieures, et par suite les plus froides de l'atmosphère, sera intercepté en partie, et dès lors le refroidissement sera moindre. C'est pour cela que les jardiniers élèvent, au-dessus des plantes qu'ils veulent préserver de la gelée, de légers abris qui n'auraient aucune efficacité s'il s'agissait de garantir du froid extérieur. Les nuages surtout, quand ils sont dans la région zénithale, jouent le rôle d'abris de ce genre ; aussi la rosée est-elle peu abondante quand le ciel est couvert.

Une légère agitation de l'air favorise le dépôt de la rosée, parce que les différentes couches atmosphériques viennent successivement se dépouiller de leur humidité ; mais si le vent est intense, la saturation n'a pas le temps de se produire et la rosée est très-peu abondante. Elle est tout à fait nulle quand se rencontrent les deux circonstances d'un ciel couvert et d'un vent plus ou moins intense.

CHAPITRE XXX.

CONDUCTIBILITÉ.

328. Conductibilité. — Lorsqu'on soumet à l'action de la chaleur l'extrémité d'une barre métallique, les différentes parties de cette barre s'échauffent progressivement. Il y a donc une propagation intérieure de la chaleur qui diffère notablement du rayonnement. En effet, elle s'effectue d'une façon toujours très-lente, tandis que le rayonnement est pour ainsi dire instantané.

On donne à cette propriété des corps de transmettre de proche en proche l'action de la chaleur le nom de *conductibilité*. Au fond l'origine de la conductibilité est le rayonnement. En effet, les molécules échauffées rayonnent vers les molécules voisines, qui agissent de même à l'égard des suivantes. Il arrive un moment où chacune d'elles reçoit une quantité de chaleur égale à celle qu'elle perd, soit par le rayonnement vers les molécules voisines, soit quand elle est près de la surface par le rayonnement vers l'extérieur, ou par communication aux couches qui environnent le corps. Ce dernier effet constitue ce que l'on appelle la conductibilité extérieure ; elle diffère de la conductibilité proprement dite, en ce que la propagation se fait entre des molécules d'espèces différentes.

329. Différences de conductibilité. — Les corps solides diffèrent beaucoup sous le rapport de leur conductibilité ; on peut mettre en évidence ces différences par diverses expériences.

Ainsi, par exemple, on place deux barres bout à bout (fig. 293), et on y fait adhérer, avec de la cire, de petites billes de bois équidistantes. On chauffe alors le point de jonction des deux barres : à

mesure que la chaleur se propage, la cire fond successivement et les billes se détachent. La barre qui conduit le mieux la chaleur est celle pour laquelle le nombre de billes qui tombent est le plus considérable, car la température de la fusion de la cire s'est propagée plus loin.

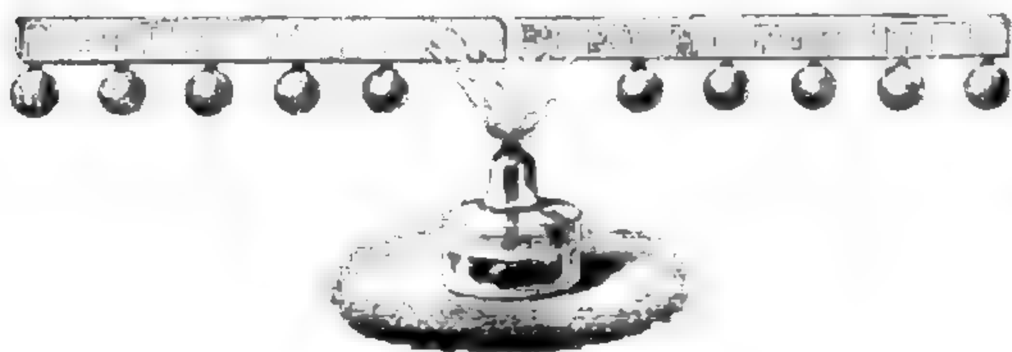


Fig. 293.

L'appareil d'Ingenhousz permet de comparer commodément la conductibilité des différents corps solides. Il se compose d'une caisse en cuivre, sur l'une des faces de laquelle sont ajustées, dans des ouvertures convenables, des tiges des diverses substances. On commence par plonger chacune de ces tiges dans de la cire fondue; quand on les retire, il en reste une couche qui s'est figée sur la surface; on verse ensuite de l'eau bouillante dans le vase. Les extrémités de toutes les tiges sont, de cette façon, portées à la température de 100°, et la chaleur se propage graduellement dans leur intérieur. On voit, en effet, la cire fondre, et ce phénomène se produit sur une longueur d'autant plus grande que la conductibilité de la substance est plus marquée.

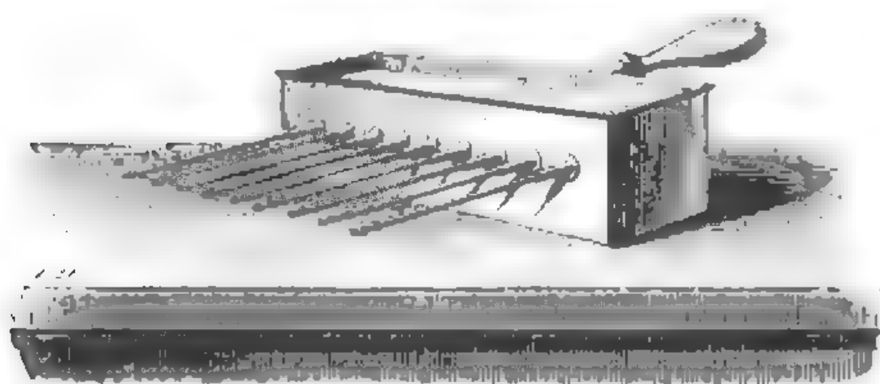


Fig. 294. — Appareil d'Ingenhousz.

On reconnaît ainsi que les métaux sont inégalement conducteurs, et qu'ils peuvent être rangés comme il suit dans l'ordre décroissant de leur conductibilité : *argent, cuivre, or, laiton, étain, fer, plomb, platine, bismuth.*

Il importe de remarquer que la conductibilité est indiquée par l'intensité de l'échauffement et non point par sa rapidité. Ce dernier effet dépend du calorique spécifique de la substance, c'est-à-dire de la quantité de chaleur nécessaire à l'élévation de sa température. Il est clair que plus le calorique spécifique sera faible, plus

la cire fondra rapidement ; mais c'est un phénomène qui n'indique rien sur la conductibilité.

330. Conductibilité des métaux. — Bien qu'inégalement conducteurs, tous les métaux ont une conductibilité très-supérieure à celle des autres substances, telles que le bois, le marbre, la brique, etc. Cette circonstance explique des faits très-connus. Ainsi, si l'on applique la main sur une plaque de métal à une température d'une dizaine de degrés, si on la plonge dans un bain de mercure, on éprouve une sensation de froid très-marquée. Cette sensation est moindre avec le marbre, moindre encore avec le bois. C'est qu'au contact de la main, qui est à une température supérieure à celle du corps touché, il y a de la chaleur cédée par voie de conductibilité, et par conséquent plus cette conductibilité sera grande, plus l'impression de froid devra être marquée.

331. Lampe des mineurs. — C'est à la conductibilité des métaux qu'est due la curieuse propriété des toiles métalliques de couper les flammes.

Si au-dessus de la flamme d'un bec de gaz, par exemple, on place une toile métallique, la flamme est interceptée. Si on fait arriver le gaz sur la toile et qu'on l'allume seulement au-dessus, la flamme ne se propage pas au-dessous. Ces faits sont une conséquence de la conductibilité de la toile métallique, en vertu de laquelle la chaleur de la flamme se dissipe rapidement dans les points touchés ; il en résulte un abaissement de température tel, que la combustion n'est plus possible.

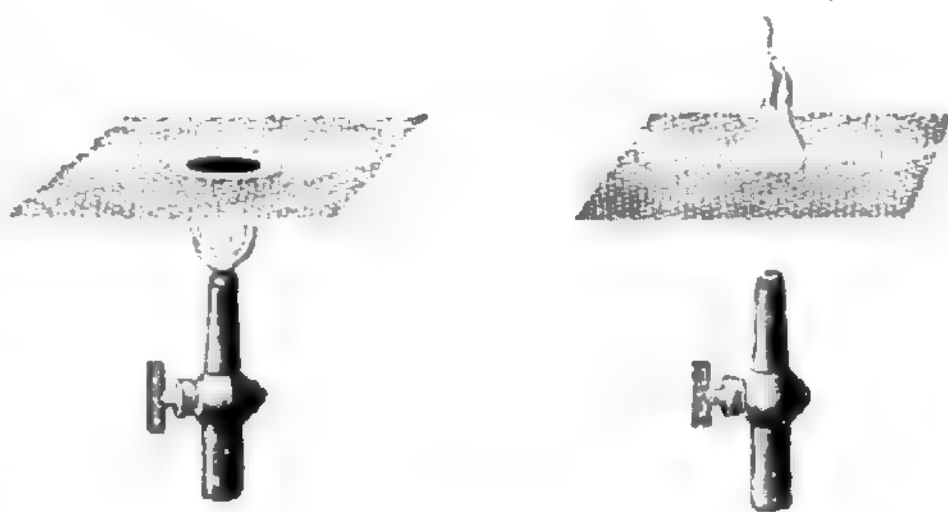


Fig. 295. — Action des toiles métalliques sur les flammes.

Ces propriétés des toiles métalliques ont été souvent utilisées, mais l'application la plus heureuse qui en ait été faite est celle de la lampe de sûreté de Davy.

Tout le monde sait que dans les mines de houille il se dégage

souvent un gaz auquel les mineurs donnent le nom de *grisou*, qui est une combinaison de carbone et d'hydrogène et qui se rencontre en assez forte proportion dans le gaz de l'éclairage.

Le mélange de grisou avec huit ou dix fois son volume d'air est susceptible de détoner avec la plus grande violence au contact d'un corps enflammé. Ces explosions, encore assez fréquentes de nos jours, l'étaient devenues à un tel point au commencement de ce siècle, que les propriétaires de mines ne trouvaient plus d'ouvriers pour leur exploitation. C'est dans ces circonstances que Davy, auquel ils eurent recours, imagina la lampe de sûreté. C'est une lampe ordinaire, entourée d'une sorte de chemise en toile métallique. Si le mélange explosif vient à se former dans la galerie, la détonation se produira à l'intérieur de la lampe, mais la flamme, interceptée par la toile métallique, ne se propagera pas au dehors; l'ouvrier, averti, pourra donc quitter la mine sans courir aucun danger.

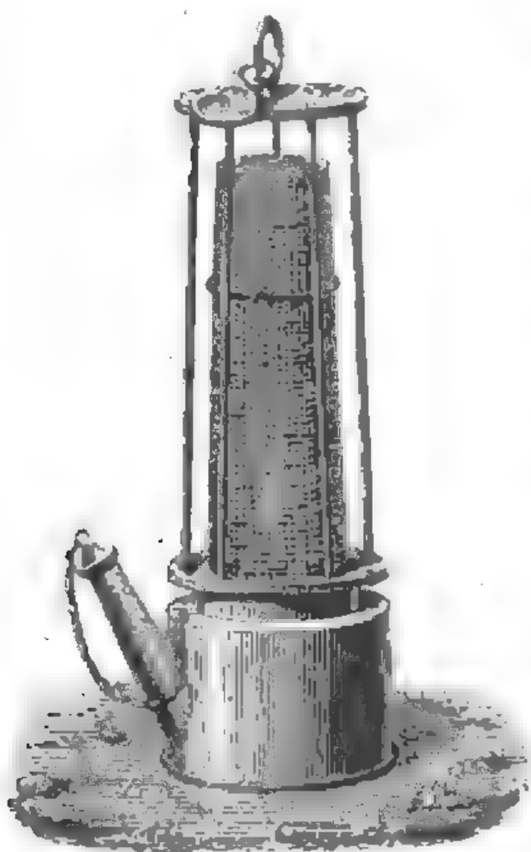


Fig. 296. — Lampe de Davy.

332. Applications diverses. — La connaissance des conductibilités relatives des différents corps conduit à quelques résultats pratiques importants.

Dans les pays froids, où il importe de conserver la chaleur développée dans les appartements, les murs des habitations doivent être en matériaux mauvais conducteurs (bois ou brique). S'ils sont en pierre, qui conduit mieux la chaleur, on doit leur donner une épaisseur plus considérable. Les murs épais sont également utiles pour se préserver des ardeurs du soleil dans les pays chauds.

Les calorifères en métal chauffent très-fortement, mais ils se refroidissent également très-vite, dès qu'ils sont éteints. Les calorifères ou poêles en brique, à cause de leur mauvaise conductibilité, se refroidissent lentement en donnant une chaleur douce, uniforme et durable; aussi les emploie-t-on exclusivement dans les pays très-froids.

On utilise la mauvaise conductibilité de la brique dans la construction des glacières. Ce sont des fosses rondes, généralement de 6 à 8 mètres de diamètre à leur ouverture et allant en se rétrécissant par le bas ; au fond se trouve un puisard fermé par une grille. Le revêtement intérieur est en brique ; à la partie supérieure la glace est recouverte de paille, corps mauvais conducteur, ainsi que nous le dirons tout à l'heure. Les mouvements de l'air sont très-fâcheux dans les glacières, ils provoquent la fonte de la glace ; on les empêche en arrosant les morceaux de glace, au moment où on les enferme, avec de l'eau ; celle-ci se congèle, ressoude tous les morceaux, qui forment ainsi comme un bloc unique très-difficile à fondre.



Fig. 297. — Glacière.

333. Mesure de la conductibilité. — L'appareil d'Ingenhousz fournit un moyen très-simple de montrer les différences de conductibilité des corps, mais elle ne conduit pas à une expression numérique qui soit la mesure du pouvoir conducteur. Pour comprendre le procédé qui a servi à effectuer cette mesure, il faut montrer d'abord comment on définit le pouvoir conducteur ou le coefficient de conductibilité d'une substance. A cet effet on imagine un mur solide *indéfini* et on suppose que les deux faces soient entretenues à deux températures constantes. Il s'établira naturellement, au bout d'un temps plus ou moins long, un état d'équilibre, et lorsque cet équilibre sera atteint, il est évident qu'il passera à chaque instant la même quantité de chaleur par une tranche quelconque du solide. Or on démontre, dans la théorie mathématique de la chaleur, que cette quantité de chaleur est proportionnelle à la différence de température des deux faces, inversement proportionnelle à l'épaisseur, et proportionnelle à une certaine constante spécifique variant

d'une matière à l'autre. C'est cette constante que l'on désigne sous le nom de *pouvoir conducteur* ou *coefficient de conductibilité intérieure.*

Cela posé, imaginons que l'on prenne une barre métallique, qu'on chauffe l'une de ses extrémités, et qu'on observe, lorsque l'équilibre sera établi, les températures qui règnent en des points équidistants. On peut, pour faire cette observation, pratiquer, comme le faisait Despretz, dans l'intérieur de la barre, de petites cavités que l'on remplit de mercure et dans lesquelles on plonge les réservoirs de petits thermomètres. On peut avec plus d'avantage se servir de pinces thermo-électriques qui permettent d'explorer la température d'un point quelconque de la barre; c'est la méthode de MM. Wiedmann et Franz. Dans tous les cas, si la barre est assez longue pour qu'il n'y ait pas d'effet calorifique sensible à l'extrémité opposée à celle que l'on chauffe, on constate toujours que les excès de température en des points équidistants forment les termes d'une progression géométrique décroissante. On peut considérer ce fait comme la loi physique de la propagation de la chaleur dans une barre. Or la question a été soumise au calcul par Fourier, qui a trouvé que l'excès de température d'une couche située à la distance x de l'origine est donné par la formule

$$T = T_0 \cdot \frac{1}{e^{x\sqrt{\frac{hp}{ks}}}}.$$

Dans cette formule, T_0 désigne l'excès de température à l'origine de la barre, e la base des logarithmes népériens, p et s le périmètre et la section de la barre, h ce que nous avons appelé plus haut la conductibilité extérieure, et enfin k le coefficient de conductibilité ou le pouvoir conducteur de la substance. On voit d'après cette formule que, si on fait successivement $x = 1, 2, 3,$ etc., les valeurs de T formeront une progression géométrique décroissante, dont la raison sera

$$q = e^{\sqrt{\frac{hp}{ks}}}.$$

Considérons une autre barre de même section, de même périmètre; supposons en outre que l'une et l'autre aient été recou-

vertes d'un vernis identique pour rendre la conductibilité extérieure égale. La raison de la progression pour les mêmes intervalles sera

$$q' = e^{\sqrt{\frac{hp}{k's}}};$$

on déduit de ces deux relations

$$\log q = \log e.\sqrt{\frac{h\,p}{k\,s}},$$

$$\log q' = \log e.\sqrt{\frac{h\,p}{k'\,s}},$$

d'où

$$\frac{(\log q)^2}{(\log q')^2} = \frac{k'}{k},$$

formule qui permettra de calculer les pouvoirs conducteurs, en fonction de l'un d'eux pris pour terme de comparaison. Le tableau suivant donne le résultat des expériences de MM. Wiedmann et Franz; le pouvoir conducteur de l'argent est représenté par 100.

Argent	100	Acier	12
Cuivre	77,6	Fer	11,9
Or	53,2	Plomb	8,5
Laiton	33	Platine	8,2
Zinc	19,9	Palladium	6,3
Étain	14,5	Bismuth	1,9

La loi théorique qui vient d'être exposée ne se vérifie pas quand on opère avec de la brique, du marbre, etc., sans doute parce que ces substances n'ont pas l'homogénéité que suppose la théorie ; mais, en tout cas, ce sont des corps très-mauvais conducteurs quand on les compare aux métaux.

334. Conductibilité des liquides. — Les liquides, à l'exception du mercure, qui se conduit comme un métal, sont très-mauvais conducteurs de la chaleur. Pour s'en assurer, il faut chauffer une colonne liquide par la partie supérieure et observer les variations de la température au-dessous. On trouve que ces variations se produisent très-lentement et sont d'ailleurs très-peu sensibles. Si l'on chauffait par la partie inférieure (fig. 298), il se produirait le phénomène que nous avons décrit plus haut et que l'on nomme *convection de la chaleur*; les couches inférieures dilatées s'élèveraient à la partie

supérieure, seraient remplacées par d'autres qui s'élèveraient à leur tour et il se produirait ainsi un double courant qui amènerait le rapide échauffement de la masse liquide. En chauffant par la partie supérieure, les couches dilatées gardent leur position et la propagation de la chaleur ne peut se faire que par conductibilité.

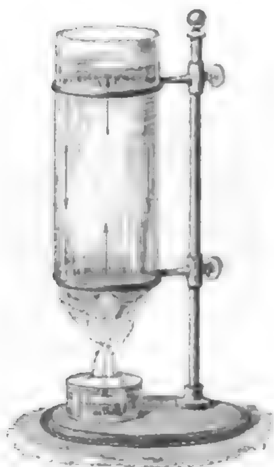


Fig. 298. — Liquide chauffé à la partie inférieure.

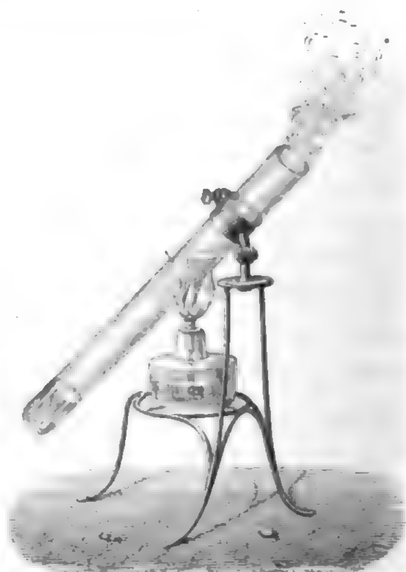


Fig. 299. — Ébullition de l'eau au-dessus de la glace.

Parmi les expériences qui démontrent la très-faible conductibilité de l'eau, nous citerons la suivante : Au fond d'un tube de verre (fig. 299) on place une petite quantité de glace sur laquelle on verse de l'eau ; on chauffe ensuite avec une lampe à alcool la portion moyenne du tube et on peut ainsi très-facilement obtenir l'ébullition de l'eau dans la partie supérieure du tube, sans faire fondre la glace qui est à la partie inférieure.

335. Mesure de la conductibilité de l'eau. — La conductibilité de l'eau pour la chaleur est très-faible sans doute, mais elle est réelle; on peut même constater que la propagation se fait dans l'intérieur de ce liquide suivant la loi expérimentale indiquée plus haut. C'est ce qui résulte de l'expérience suivante de Despretz : Il employait une sorte de cuve cylindrique en bois (fig. 300), de

1 mètre de hauteur environ et de 0m,20 de diamètre, contenant de l'eau. Sur une des arêtes du cylindre étaient placés 12 thermomètres dont le réservoir occupait le centre de la colonne liquide. A la partie supérieure de la colonne se trouve une boîte en métal dans laquelle on faisait arriver de l'eau à une température voisine de 100° et qu'on renouvelait très-fréquemment. Despretz a observé dans ces circonstances que la température des thermomètres s'élève graduellement; mais il faut longtemps, une trentaine d'heures environ, pour qu'ils acquièrent un excès stationnaire. Ces excès, formant les termes d'une progression géométrique décroissante, sont d'ailleurs très-faibles, et, à partir du sixième thermomètre, Despretz constata qu'il n'y avait pas d'échauffement appréciable.



Fig. 300. — Mesure de la conductibilité de l'eau.

On pourrait attribuer l'élévation de température des thermomètres à la communication par les parois; cela est peu probable vu leur mauvaise conductibilité. Mais d'ailleurs une remarque de Despretz prouve qu'il ne peut en être ainsi; il constata, en effet, que la température est plus élevée sur l'axe de la colonne liquide que dans le voisinage des parois; ce serait le contraire si ces parois avaient servi à la propagation de la chaleur.

336. Conductibilité des gaz. — Il est à peu près impossible de faire des épreuves directes sur la conductibilité des gaz, parce qu'il est très-difficile de se mettre à l'abri des effets de la convection et du rayonnement direct. On peut toutefois affirmer que ces corps sont très-mauvais conducteurs. Toutes les fois, en effet, que les gaz sont renfermés dans de petites cavités où leur mouvement est difficile,

le système ainsi constitué conduit très-mal la chaleur. C'est là l'origine de la mauvaise conductibilité de beaucoup de tissus, des fourrures, des édredons, des feutrages, de la paille, de la sciure de bois, etc. Les corps de ce genre que nous employons pour nos vêtements sont appelés *chauds;* c'est une sorte d'expression figurée, qui n'a aucun trait, bien entendu, à leur propre température, mais qui signifie simplement qu'ils sont très-propres à nous garantir du froid extérieur; cela tient à leur défaut de conductibilité. Si l'on comprimait un édredon ou une fourrure de façon à expulser une grande partie de l'air et à les réduire à une lame mince, ces corps deviendraient beaucoup moins *chauds,* c'est-à-dire meilleurs conducteurs. C'est donc à la présence de l'air qu'ils doivent leur défaut de conductibilité, et par suite on ne saurait se refuser à admettre que l'air est un corps mauvais conducteur.

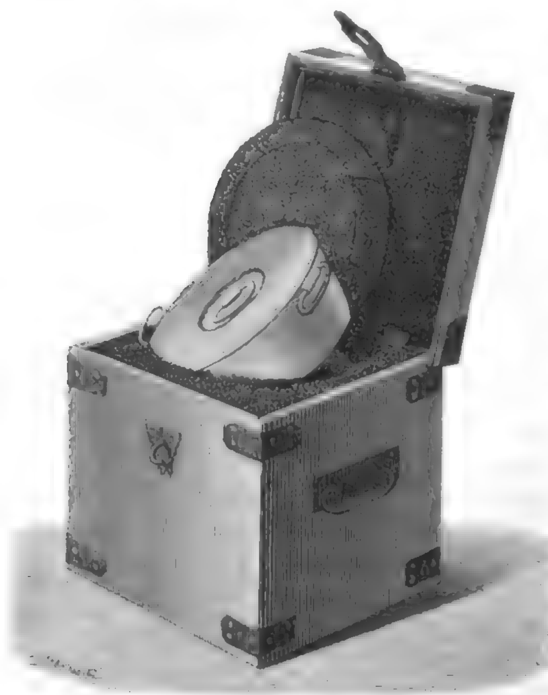


Fig. 301. — Marmite automatique.

337. Marmite automatique. — Le défaut de conductibilité des garnitures en feutre est quelquefois utilisé dans le nord de l'Europe à la construction d'un appareil assez curieux, connu sous le nom de marmite automatique.

C'est une boîte doublée à l'intérieur d'une forte couche de feutre et pouvant recevoir, dans une ouverture convenable, une marmite métallique munie d'un couvercle. Au-dessus de celui-ci, on place un coussin formé également de feutre, de sorte que

la marmite se trouve située au centre d'une enveloppe très-peu conductrice. Si on introduit dans la marmite de la viande, par exemple, avec de l'eau et les assaisonnements convenables, qu'on produise l'ébullition de l'eau et qu'on enferme alors l'appareil dans la boîte, on pourra abandonner l'expérience à elle-même, la cuisson se continuera *sans feu*, et, au bout de quelques heures, elle sera entièrement terminée. Le pouvoir isolant de la garniture, au point de vue de la chaleur, est très-puissant ; on peut constater en effet qu'au bout de trois heures la température de l'eau ne s'est pas abaissée de plus de 10 à 15° ; elle est donc restée pendant tout ce temps suffisamment élevée pour produire la cuisson.

338. Conductibilité de l'hydrogène. — L'hydrogène présente un pouvoir conducteur très-supérieur à celui des autres gaz ; cette circonstance est tout à fait en rapport avec la nature attribuée à ce gaz par les chimistes, qui le considèrent comme une sorte de métal gazeux. On démontre la conductibilité de l'hydrogène par les expériences suivantes :

1° On tend dans l'intérieur d'un tube (fig. 302) un mince fil de platine, dont on provoque l'incandescence par le passage d'un courant. Si l'on fait circuler de l'air ou d'autres gaz dans l'appareil, cette incandescence se maintient, à des degrés divers toutefois, et toujours à un degré moindre que quand on fait le vide. Mais si l'on vient à faire passer de l'hydrogène, l'incandescence disparaît.



Fig. 302. — Pouvoir refroidissant de l'hydrogène.

2° On place au fond d'un tube vertical un thermomètre que l'on échauffe par de l'eau bouillante placée à la partie supérieure. On fait le vide dans le vase et on y fait ensuite successivement pénétrer différents gaz. On remarque que la présence de ces derniers détermine un abaissement de température. Au contraire, l'hydrogène produit un phénomène inverse. C'est la preuve directe de sa conductibilité qui ajoute quelque chose à l'effet du rayonnement.

CHAPITRE XXXI.

CALORIMÉTRIE.

339. Quantités de chaleur. — La calorimétrie renferme l'ensemble des expériences à l'aide desquelles on a mesuré les *quantités de chaleur* produites ou absorbées dans les divers phénomènes thermiques que peuvent présenter les corps. Au premier abord il peut paraître singulier qu'on se propose de mesurer une quantité de chaleur, lorsqu'on ignore la nature même de l'agent auquel on donne ce nom; mais cette singularité n'est qu'apparente, et il n'y a dans la recherche des quantités de chaleur rien qui diffère essentiellement de ce qui a lieu dans beaucoup d'autres circonstances. Il n'est pas nécessaire, en effet, de connaître la nature d'une chose pour qu'il soit possible de la mesurer; s'il en était ainsi, il faudrait renoncer à mesurer quoi que ce soit, car il n'y a certainement rien au monde dont l'essence nous soit connue. Mesurer, c'est chercher le rapport qui existe entre une quantité de nature quelconque et une quantité de même espèce prise pour unité. L'évaluation rigoureuse de ce rapport suppose uniquement la notion précise de quantités égales. Ainsi, par exemple, nous ignorons ce que c'est que la force, le temps, l'angle, etc.; mais nous définissons d'une façon très-nette des forces égales, des temps et des angles égaux, et dès lors nous concevons la réunion d'un nombre quelconque de ces quantités égales, nombre qui est précisément la mesure numérique de la quantité dont il s'agit rapportée à son unité.

En ce qui tient à la chaleur, on procède d'une façon semblable. On convient de prendre pour unité un phénomène calori-

fique déterminé, par exemple l'élévation de température d'un kilogramme d'eau de 0 à 1°. On appelle *calorie* la quantité de chaleur nécessaire pour la production de ce phénomène.

Si deux actions thermiques appliquées à l'échauffement de 1 kilogramme d'eau à 0 produisent chacune une élévation de température de 1 degré, on dit qu'elles dégagent chacune une *même quantité de chaleur* égale à une calorie. Ces actions thermiques peuvent du reste être très-différentes : l'une sera, par exemple, la combustion du charbon; l'autre, le frottement, etc. En disant que les quantités de chaleur produites dans ces deux cas sont égales, nous employons une forme de langage tout à fait identique à celle qui consiste à dire que deux forces sont égales lorsqu'elles produisent la même flexion d'un dynamomètre. Le fondement de la calorimétrie est donc aussi logique et aussi rigoureux que celui de la mécanique.

D'après la définition de l'unité de chaleur, on voit que si un phénomène quelconque produit l'élévation de température de m kilogrammes d'eau de 0 à 1°, il y aura production de m calories. Il serait difficile, pour ne pas dire impossible, de régler le phénomène thermique qu'on étudie de façon à produire dans l'eau une élévation de température de 0 à 1°; mais il n'est pas nécessaire de s'assujettir à cette condition. On peut constater, en effet, que toutes les fois, du moins, qu'il s'agit de températures ne s'élevant pas au-dessus de 30 ou 40°, la quantité de chaleur nécessaire à une variation de température de 1°, en général, est très-sensiblement la même que celle qui correspond à l'élévation de 0 à 1°. Admettons, en effet, qu'il en soit ainsi, et cherchons, dans cette hypothèse, à calculer la température de la masse d'eau qui résulterait du mélange de 3 kilogrammes d'eau à 15° avec 5 kilogrammes d'eau à 35°, par exemple. Il est clair que cette température d'équilibre se produira au moment où l'eau chaude ayant cédé de la chaleur à l'eau froide, les deux quantités mêlées l'une à l'autre seront à une même température qui est précisément celle d'équilibre, et qui est naturellement intermédiaire entre les températures initiales. Désignons-la par x. Les 3 kilogrammes d'eau à 15° auront absorbé dans ce changement, et suivant l'hypothèse faite,

3 $(x - 15)$ calories. De même les 5 kilogrammes à 35° auront abandonné, en se refroidissant jusqu'à x, $5(35 - x)$ calories. Or la quantité de chaleur absorbée d'un côté est évidemment et nécessairement égale à celle qui est dégagée de l'autre; on a donc la relation

$$3(x - 15) = 5(35 - x),$$

d'où

$$x = 27{,}5.$$

Or dans quelques circonstances qu'ait été faite une expérience de ce genre, en s'entourant de toutes les précautions pour se mettre à l'abri des diverses causes d'erreur qu'elle comporte, on a toujours trouvé un accord parfait entre le calcul et l'observation. On peut donc, en s'appuyant sur elle, dire qu'une calorie est en général la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier 1 kilogramme d'eau de 1°, pourvu qu'on opère à des températures qui ne s'éloignent pas de 0 de plus d'une quarantaine de degrés. Il suffira donc, pour déterminer la quantité de chaleur produite dans un phénomène quelconque, de mesurer la variation de température produite sur une masse d'eau. Nous allons indiquer sommairement la manière dont cette méthode a été appliquée à la mesure des quantités de chaleur :

1° Dans les variations de température des différents corps (chaleurs spécifiques);

2° Dans les changements d'état (chaleurs de fusion, de vaporisation);

3° Dans les sources de chaleur (chaleur de combustion, de combinaison, etc.).

340. Chaleur spécifique. — On appelle *capacité spécifique* d'un corps ou *capacité calorifique* la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de poids de ce corps de 0 à 1°. Si l'on désigne par Q la quantité de chaleur nécessaire pour élever l'unité de poids d'un corps de 0 à T°, le quotient $\frac{Q}{T}$ est ce que l'on appelle la chaleur spécifique moyenne de 0 à T. L'expérience prouve que cette quantité est à peu près la même quelle que soit la température, pourvu qu'elle ne dépasse pas 100°. On conclut de là qu'il

faut sensiblement la même quantité de chaleur pour une variation de température de 1°; de sorte qu'on peut définir la chaleur spécifique d'un corps, la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier l'unité de poids de ce corps de 1°. Il suit de ce qui précède que, si on désigne le calorique spécifique d'un corps par C, il faudra, pour échauffer l'unité de poids de ce corps de T degrés, CT unités de chaleur. Inversement, si ce corps se refroidit de T degrés, il abandonnera une quantité de chaleur égale à CT. Si le corps considéré a un poids P, la quantité de chaleur absorbée ou produite dans les mêmes circonstances sera évidemment PCT.

Il y a sous le rapport des chaleurs spécifiques de très-grandes différences entre les corps. On peut le montrer très-aisément par l'expérience suivante :

On se sert d'un disque de cire à la surface duquel on pose des boules de même poids et chauffées à une même température de 200° par exemple. Chacune des boules cède de la chaleur à la cire, détermine sa fusion et pratique ainsi une ouverture à travers laquelle elle passe. Or celles dont la capacité calorifique est la plus grande passent les premières; c'est ainsi qu'on voit d'abord tomber successivement les boules de fer, de cuivre et d'étain. Les boules de plomb et de bismuth sont beaucoup plus en retard, et si le disque est un peu épais, elles ne parviennent pas à le traverser.

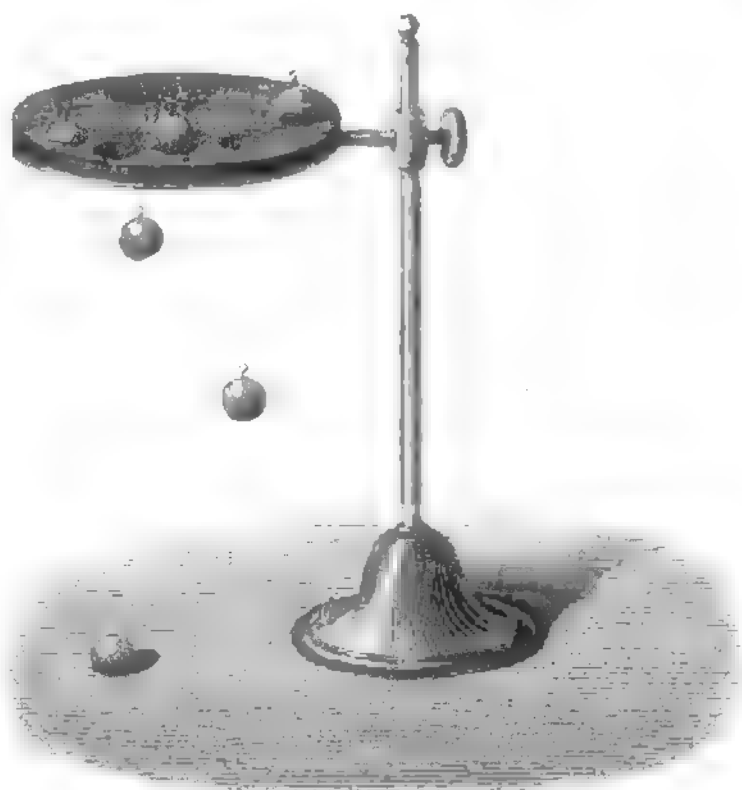


Fig. 303. — Expérience pour montrer la différence de calorique spécifique des diverses substances.

L'expérience suivante permet de constater la très-grande différence des caloriques spécifiques du mercure et de l'eau :

On prend un vase contenant 1 kilogramme d'eau à 10° et on verse dans son intérieur 1 kilogramme de mercure à 100°. On agite le mélange, la température s'élève graduellement et atteint

au bout de peu d'instants la valeur maxima de 12°; cela a lieu au moment où le mercure et l'eau sont à la même température. On voit d'après cette expérience que l'eau a gagné 2 calories; ces deux calories lui ont été fournies par le mercure qui s'est abaissé de 88°. La quantité de chaleur qui produit dans ce métal une variation de température de 88°, ne produit donc dans la même masse d'eau qu'une variation de 2°. Le calorique spécifique du mercure est donc 44 fois plus petit que celui de l'eau. Le calorique spécifique de l'eau est 1, c'est la même chose qu'une calorie; le calorique spécifique du mercure est donc à peu près égal, d'après cette expérience, à $\frac{1}{44} = 0,028$.

La détermination exacte de cette quantité demanderait des précautions minutieuses dont nous parlerons tout à l'heure. Nous ne considérons, pour le moment, l'expérience précédente que comme un moyen de montrer l'inégalité des chaleurs spécifiques de l'eau et du mercure. On peut employer pour la détermination des chaleurs spécifiques diverses méthodes, parmi lesquelles nous citerons seulement les deux suivantes.

341. Méthode du puits de glace. — On creuse dans un bloc compacte de glace une cavité qui peut se fermer à l'aide d'un couvercle également en glace. D'autre part, on chauffe un poids P d'un corps jusqu'à la température T et on l'introduit dans le puits de glace qu'on recouvre immédiatement de son couvercle. Le corps se refroidit jusqu'à 0, abandonne ainsi de la chaleur qui détermine la fusion d'une certaine quantité de glace que l'on recueille et que l'on pèse. Soit m son poids, la quantité de chaleur nécessaire à sa fusion est, d'après ce qui a été dit (128), $m \cdot 79$. Mais cette chaleur provient du corps qui s'est abaissé de T degrés, ce qui correspond à une quantité de chaleur abandonnée égale à PCT, C désignant son calorique spécifique. On a donc $PCT = m \cdot 79$, d'où $C = \frac{79\,m}{PT}$.

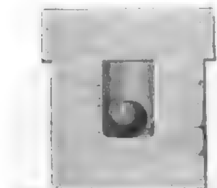


Fig. 304. — Puits de glace.

Ce procédé, dû au physicien suédois Wilke, est d'une application difficile dans nos climats; il est d'ailleurs d'une exactitude

douteuse par suite de l'incertitude où l'on est sur la température initiale de la glace, qui pourrait fort bien, surtout si le bloc est très-épais, n'être pas 0.

342. Méthode des mélanges. — Principe. — La méthode des mélanges consiste dans une expérience analogue à celle que nous avons indiquée pour montrer l'inégalité des chaleurs spécifiques de l'eau et du mercure.

On prend un poids déterminé P d'un certain corps et on le porte à une certaine température T. On a d'autre part, dans un vase de cuivre appelé *calorimètre*, un poids P' d'eau à la température t. On plonge le corps dans l'eau, celle-ci s'échauffe et atteint une certaine température maxima que l'on note et que nous appellerons θ. Dans l'échange de chaleur qui se produit, l'eau a gagné une quantité de chaleur égale à $P'(\theta - t)$; le corps, au contraire, a perdu une quantité de chaleur exprimée par $Px(T-\theta)$, x désignant son calorique spécifique. En égalant ces deux quantités, on a

$$P'(\theta - t) = Px(T - \theta), \qquad (a)$$

d'où

$$x = \frac{P'(\theta - t)}{P(T - \theta)}.$$

343. Causes d'erreur. — Tel est le principe de la méthode des mélanges; mais il est aisé de voir, en examinant la chose d'un peu près, que l'équation (*a*) n'est qu'approchée, et cela pour diverses raisons.

I. Cette équation suppose qu'il n'y a d'échange de chaleur qu'entre le corps et l'eau; en réalité il n'en est pas ainsi.

1° Le corps est souvent renfermé dans une enveloppe qui se refroidit avec lui et qui fournit une partie de la chaleur cédée.

2° Ce n'est pas seulement l'eau du calorimètre qui s'échauffe, c'est aussi le calorimètre lui-même, le thermomètre, et les autres organes qui pourraient éventuellement exister; par exemple, un agitateur qu'on emploierait à établir l'uniformité de température dans la masse liquide.

Rien de plus aisé d'ailleurs que d'établir l'équation qui exprime l'échange de chaleur dans le cas le plus général : il suffit d'écrire

que la quantité de chaleur cédée par le corps et son enveloppe est égale à celle qu'ont gagnée le calorimètre, le thermomètre et l'agitateur. Soient :

P le poids du corps;
T sa température initiale;
x son calorique spécifique;
m le poids de l'enveloppe;
α son calorique spécifique;
P' le poids de l'eau contenue dans le calorimètre;
p le poids du calorimètre;
c son calorique spécifique;
p' le poids du verre du thermomètre;
c' son calorique spécifique;
p'' le poids du mercure;
c'' son calorique spécifique;
p''' le poids de l'agitateur;
c''' son calorique spécifique;
θ la température finale.

Il est évident que l'on aura l'équation

$$Px(T-\theta)+m\alpha(T-\theta)=(P'+pc+p'c'+p''c''+p'''c''')(\theta-t),$$

équation d'où on déduit

$$x=\frac{(P'+pc+p'c'+p''c''+p'''c''')(\theta-t)-m\alpha(T-\theta)}{P(T-\theta)}.$$

L'équation précédente est le type de toutes celles qui se rapportent à des questions de cette nature; il ne peut y avoir de différence que dans le nombre de termes, chacun d'eux exprimant toujours une quantité de chaleur gagnée ou perdue par l'un des corps qui entrent dans le mélange,

L'expression qui dans la valeur de x multiplie $(\theta-t)$ est ce qu'on appelle la *valeur du calorimètre réduite en eau;* en effet, dans une masse d'eau égale à cette quantité, et qui recevrait exclusivement la chaleur cédée dans l'expérience, la variation thermométrique serait précisément celle que l'on a observée. Dans les termes qui constituent la valeur en eau du calorimètre se trouve

le calorique spécifique de la matière qui forme le calorimètre et l'agitateur; cette matière est ordinairement du laiton, et on peut considérer son calorique spécifique comme suffisamment connu par des expériences antérieures. Quant aux deux termes dépendant du thermomètre, on peut les déterminer directement dans une expérience spéciale en expérimentant sur un corps dont le calorique spécifique soit connu.

II. Le calorimètre, échauffé par le corps que l'on immerge dans son extérieur, perd par le rayonnement une certaine quantité de chaleur, dont il est nécessaire de tenir compte si l'on veut opérer rigoureusement. Rumford avait proposé dans ce but une méthode dite de compensation, qui est fort simple. Elle consiste à abaisser la température initiale du calorimètre au-dessous de la température ambiante d'un nombre de degrés précisément égal à celui qui marquera l'excès de la température finale; un tâtonnement préliminaire permet d'arriver facilement à ce résultat. De cette façon, on peut diviser l'expérience en deux périodes : l'une pendant laquelle le calorimètre gagne de la chaleur par rayonnement, l'autre pendant laquelle il en perd; et comme les excès sont les mêmes, on peut admettre que ces quantités de chaleur sont égales. Toutefois cette compensation n'est pas rigoureuse, parce que les deux périodes n'ont pas la même durée; aussi les expérimentateurs ont-ils généralement suivi une méthode différente. Ils déterminent par le procédé indiqué (307) la constante propre à la vitesse du refroidissement du calorimètre, et ils s'en servent pour calculer directement le nombre de degrés perdus par rayonnement. Pour faire ce calcul, au lieu de supposer que la variation de température se fait d'une manière continue, ils divisent la durée de l'expérience en un certain nombre de parties pendant lesquelles ils supposent l'excès constant; ce procédé approché est toujours suffisant.

III. Le calorimètre perd aussi de la chaleur par les supports. On ne peut à cet égard qu'atténuer l'effet produit; mais en employant des supports très-mauvais conducteurs, en diminuant leur section et l'étendue des surfaces sur lesquelles le calorimètre repose, on pourra négliger tout à fait la chaleur perdue par cette voie.

Ajoutons que des précautions spéciales doivent être prises pour

que la température initiale du corps soit bien connue, et pour éviter le refroidissement dans le trajet de l'enceinte où il est chauffé au calorimètre.

344. Appareil de M. Regnault. — M. Regnault a fait sur les chaleurs spécifiques des solides et des liquides un très-important travail, en se servant d'un appareil où sont réunies les meilleures conditions de commodité et d'exactitude. Le corps à étudier, divisé en petits fragments, est renfermé dans une corbeille cylindrique G en fils de laiton très-minces. Cette corbeille est portée dans une

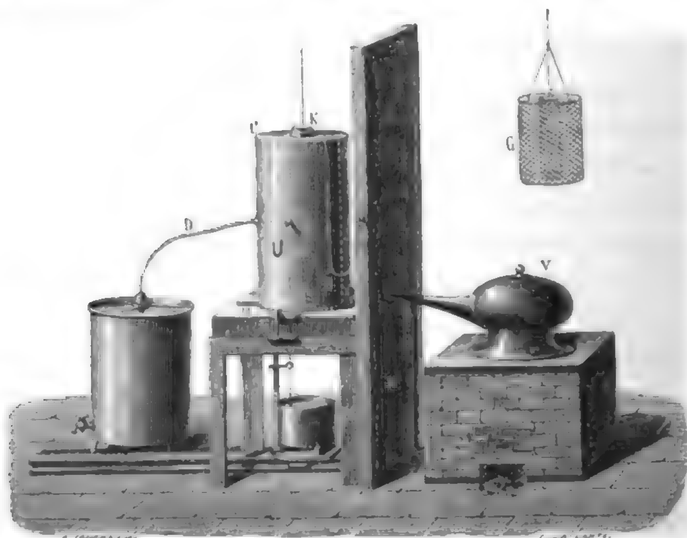


Fig. 305. — Appareil de M. Regnault.

étuve A fermée supérieurement par le bouchon K et inférieurement par un registre E que l'on peut tirer à volonté. La corbeille, supportée par un fil, est suspendue au bouchon K, qui laisse passer la tige d'un thermomètre dont le réservoir occupe un petit tube placé au centre de la corbeille et formé de même matière qu'elle. L'étuve est entourée d'une double enveloppe; dans l'une B circule de la vapeur d'eau qui, produite dans la chaudière V, va se condenser par le moyen du tube D dans un réfrigérant; la seconde enveloppe C renferme de l'air, elle est destinée à empêcher la partie intérieure de se refroidir par le contact de l'air extérieur.

Tout le système repose sur la portion M d'un vase métallique

creux en forme d'équerre, rempli d'eau et dont la face verticale N sert d'écran et protége le calorimètre contre l'action du foyer. Ce calorimètre est formé d'un vase en laiton très-mince et poli, reposant sur des fils de soie tendus au fond d'un second vase plus grand qui l'enveloppe. Ce dernier est porté par trois points sur un petit chariot en bois pouvant glisser facilement sur une règle servant de rail. Une petite potence dépendant du chariot supporte le thermomètre qui est destiné à donner la température de l'eau du calorimètre. Cela posé, voici la marche d'une expérience :

Le corps étant introduit dans la corbeille, on place celle-ci dans l'étuve et on fait circuler la vapeur. Pendant que cette opération s'exécute, le calorimètre est éloigné autant que possible de l'appareil. Au bout d'un temps variable, mais qui est toujours assez long, le thermomètre de l'étuve atteint une température stationnaire.

On amène à ce moment le calorimètre au-dessous du registre E, on tire celui-ci, et décrochant rapidement la corbeille, on la descend dans le calorimètre, qu'on ramène immédiatement dans sa position initiale. On agite l'eau qu'il contient et on note la température finale du mélange. On a ainsi tous les éléments nécessaires pour l'établissement de l'équation indiquée plus haut.

Pour opérer sur les liquides, on les renferme dans de petits tubes de verre très-mince, et on tient naturellement compte dans l'équation des mélanges de l'effet dû à cette enveloppe auxiliaire.

On prend la même précaution pour les corps solubles dans l'eau ou attaquables d'une manière quelconque par elle. On peut aussi employer au lieu de l'eau un autre liquide, par exemple l'essence de térébenthine.

Voici le tableau de la chaleur spécifique de quelques substances :

Eau. 1,00000

SOLIDES.

Antimoine.	0,05077	Charbon de bois.	0,24150
Argent.	0,05601	Cuivre.	0,09215
Arsenic.	0,08140	Diamant	0,14680
Bismuth.	0,03084	Étain.	0,05623
Cadmium.	0,05669	Fer.	0,11379

SOLIDES.

Iode	0,05412	Platine	0,03243
Laiton	0,09391	Plomb	0,03140
Mercure	0,03332	Plombagine	0,21800
Nickel	0,10860	Soufre	0,20259
Or	0,03244	Verre	0,19768
Phosphore	0,18870	Zinc	0,09555

LIQUIDES.

Acide acétique	0,6589	Esprit de bois	0,8009
Alcool à 36 degrés	0,6735	Éther	0,5157
Benzine	0,3952	Essence de térébenthine	0,4629

345. Remarques sur le calorique spécifique de l'eau. — On voit à l'inspection de ce tableau que l'eau est de tous les corps celui dont le calorique spécifique est le plus considérable ; c'est, par conséquent, celui qui absorbe le plus de chaleur pour s'échauffer du même nombre de degrés. Ainsi, par exemple, un kilogramme d'eau pour s'échauffer de 0 à 100° absorbe une quantité de chaleur égale à 100 calories environ. La même quantité de chaleur appliquée à un kilogramme de fer élèverait sa température de près de 1000 degrés, c'est-à-dire au rouge clair très-prononcé. Comme d'ailleurs le pouvoir conducteur de l'eau est très-faible, il en résulte que son refroidissement doit être très-lent, et qu'elle est, par conséquent, susceptible de fournir pendant longtemps, aux corps environnants, la chaleur qu'elle a absorbée. C'est le principe du chauffage à l'eau chaude, c'est aussi le fondement de pratiques très-connues. Par exemple, si l'on place dans un lit une bouteille de verre ou de grès contenant de l'eau bouillante, la chaleur abandonnée par l'eau suffira à maintenir pendant sept ou huit heures une température convenablement élevée. Si on se servait, comme on le fait quelquefois, d'un fer même chauffé bien au-dessus de 100°, l'effet calorifique serait plus intense et plus prompt, mais de bien plus courte durée.

C'est surtout au point de vue des températures terrestres que la grande capacité calorifique de l'eau joue un rôle important. Si on rapproche, en effet, cette propriété de celles qui ont été indi-

quées (228 et 253), on voit que toutes les fois que l'eau éprouve une modification thermique d'une nature quelconque, il y a absorption ou production d'une très-grande quantité de chaleur. Si, par exemple, la température s'élève, une grande quantité de la chaleur mise en jeu est employée soit à l'échauffement de l'eau elle-même, soit à sa vaporisation, soit à la fusion de la glace s'il en existe. La température vient-elle à baisser, au contraire, une notable quantité de chaleur est rendue à l'air par le refroidissement de l'eau, la condensation de la vapeur ou la formation de la glace. Dans les deux cas, la variation de température se trouve considérablement restreinte.

L'eau joue donc dans la nature le rôle de modérateur des températures, de même que dans une machine le volant sert à empêcher les grandes variations de vitesse. Cette comparaison a, au fond, une très-grande justesse, car, dans l'un et l'autre cas, c'est par la communication du mouvement à des masses difficiles à ébranler que s'obtient le résultat indiqué.

Si l'eau venait à disparaître de la surface du globe, il se produirait, du jour à la nuit, d'extraordinaires variations de température, hors de toute proportion avec celles que nous pouvons observer.

346. Loi de Dulong et Petit. — Dulong et Petit ont remarqué qu'en multipliant le calorique spécifique des différents corps par ce qu'on appelle, en chimie, leur poids atomique, on obtient un produit constant. Cette loi a une importance considérable; elle prouve que les atomes exigent pour s'échauffer du même nombre de degrés la même quantité de chaleur. En effet, si p est le poids atomique d'un corps et c son calorique spécifique, la quantité de chaleur nécessaire pour une variation de température de 1° est $c\,p$; c'est précisément ce produit qui est constant d'après la loi de Dulong et Petit.

Dans les corps composés chimiques analogues, par exemple dans les sulfates neutres, les azotates neutres, les protochlorures, etc., le produit du poids atomique par le calorique spécifique est aussi un nombre constant (loi de Neumann). Ce nombre varie d'ailleurs d'un genre de composés à l'autre.

347. Chaleurs spécifiques des gaz. — La nature et les bornes

de ce traité ne nous permettent d'entrer dans aucun détail sur l'expérimentation assez compliquée qui convient à la recherche du calorique spécifique des gaz. Nous remarquerons seulement qu'il convient ici de distinguer deux sortes de caloriques spécifiques :

1° *Calorique spécifique à pression constante.* — C'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré l'unité de poids d'un gaz, ce gaz pouvant se dilater librement en conservant la même pression ;

2° *Calorique spécifique à volume constant.* — C'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 degré l'unité de poids de ce gaz, celui-ci étant contraint à conserver un volume invariable.

Il est évident que le premier calorique spécifique est plus grand que le second, car il renferme, outre celui-ci, la chaleur nécessaire à la dilatation.

La même distinction peut d'ailleurs être faite dans les caloriques spécifiques des solides et des liquides, mais elle n'a pas d'importance pratique, parce qu'en réalité ces corps se dilatent toujours librement quand ils s'échauffent. Il en est tout autrement dans les gaz : aussi le rapport du calorique spécifique à pression constante ou calorique spécifique à volume constant joue-t-il un grand rôle dans toutes les questions relatives à la mécanique des gaz. D'après les expériences de Clément Desormes et de Masson, ce rapport est égal à 1,41.

348. Chaleurs de fusion. — La quantité de chaleur absorbée dans le passage d'un corps de l'état solide à l'état liquide peut se déterminer par une expérience de mélange analogue à celle qui sert à la détermination des caloriques spécifiques. Supposons, par exemple, que dans un calorimètre contenant de l'eau on plonge un fragment de glace soigneusement pesé et à la température de zéro; l'eau du calorimètre se refroidit et atteint une certaine température finale que l'on observe. Soient :

m le poids du calorimètre réduit en eau ;

t sa température initiale ;

θ sa température finale ;

p le poids de la glace ;

x le calorique de fusion.

La chaleur absorbée par la glace en fondant est px; cette chaleur est empruntée au calorimètre qui en perd une quantité représentée par $m\,(t-\theta)$, on a donc la relation $m\,(t-\theta)=px$, d'où on déduit la valeur de x. Cette expérience se prolongeant pendant assez longtemps, il est essentiel de tenir compte du rayonnement du calorimètre. A cet effet, on observe pendant tout le temps de l'observation les températures successives du thermomètre plongé dans son intérieur, et par la méthode indiquée plus haut (343) on peut en déduire les quantités de chaleur gagnées ou perdues. C'est ainsi que Laprovostaye et Desains ont trouvé, pour le calorique de fusion de la glace, 79,25.

Quand le corps fond à une température élevée, on procède d'une manière inverse. On fond le corps et on le plonge dans le calorimètre. Il faut dans cette opération prendre des précautions pour empêcher la vaporisation de l'eau; par exemple, enfermer le corps dans une petite boîte mince qui n'est tout à fait ouverte que vers la fin de l'expérience. Soient

P le poids du calorimètre réduit en eau;
t sa température initiale;
θ sa température finale;
p le poids du corps;
T sa température initiale;
T′ sa température de fusion;
c son calorique spécifique à l'état solide;
c' son calorique spécifique à l'état liquide.

L'équation de l'expérience sera évidemment

$$P\,(\theta-t)=p\,x+p\,c'\,(T-T')+p\,c\,(T'-\theta),$$

abstraction faite du terme correctif dû au rayonnement que l'on déterminera par les moyens ordinaires.

Dans cette équation se trouve le calorique spécifique du corps à l'état solide que l'on peut considérer comme connu. Quant au calorique spécifique à l'état liquide, on peut le déduire de la combinaison de l'équation précédente avec une autre analogue, mais en prenant une température initiale du corps fondu différente. Une détermination analogue, mais inverse, devra être faite quand il

s'agit de corps qui, comme le brome, le mercure, sont liquides aux températures ordinaires; c'est alors le calorique spécifique à l'état solide qu'il faudra déterminer.

Voici le tableau des chaleurs de fusion de quelques substances :

SUBSTANCES.	POINT DE FUSION.	CHALEURS SPÉCIFIQUES		CHALEUR latente DE FUSION.
		A L'ÉTAT solide.	A L'ÉTAT liquide.	
Eau.	0°	0,5040	1,0000	79,250
Phosphore	44.20	0,2000	0,2000	5,400
Soufre.	111	0.2020	0.2340	9,368
Brome.	— 7,32	0,0840	0,1670	16,185
Étain	232	0,0560	0,0640	14,252
Bismuth.	266	0,0308	0,0363	12,640
Plomb.	326	0,0314	0.0402	5,369
Mercure.	— 39	0,0319	0,0333	2,820

349. Chaleur de vaporisation. — La chaleur latente de vaporisation des liquides, et en particulier celle de l'eau, peut se me-

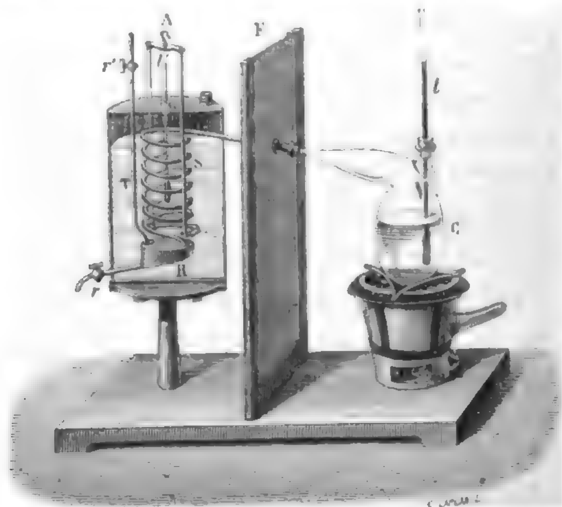


Fig. 306. — Appareil de Despretz.

surer à l'aide de l'appareil de Despretz, représenté par la figure 306.

On fait bouillir le liquide dans une cornue C dont le col com-

munique avec un serpentin S entouré d'eau froide et aboutissant au réservoir R. La vapeur condensée dans le serpentin se réunit dans ce réservoir, d'où on peut l'extraire à l'aide du robinet r. Le tube T sert à mettre en communication le réservoir, à l'aide du robinet r', soit avec l'atmosphère, soit avec un espace où règne une pression déterminée, de façon à obtenir l'ébullition à une température plus ou moins élevée, que fait dans tous les cas connaître le thermomètre t. A est un agitateur destiné à maintenir constante la température de la masse d'eau du calorimètre, température qui est accusée par le thermomètre t'. Pour procéder à une expérience, on commence par faire bouillir le liquide dans la cornue, et ce n'est que lorsqu'il est en pleine ébullition qu'on établit la communication avec le serpentin. On a abaissé la température du calorimètre, au-dessous de celle de l'air ambiant, d'un certain nombre de degrés, et on poursuit l'expérience jusqu'au moment où elle lui est devenue supérieure du même nombre de degrés. De cette façon, comme le réchauffement est à peu près uniforme, on peut admettre que la compensation est exacte.

Soit P le poids du calorimètre réduit en eau, t sa température initiale, θ sa température finale, la quantité de chaleur gagnée par lui est $P(\theta - t)$; cette quantité de chaleur provient, d'une part, de la chaleur latente dégagée au moment de la condensation de la vapeur, et en second lieu de l'abaissement de température de l'eau condensée, depuis la température T d'ébullition du liquide jusqu'à celle du calorimètre. On aura donc, en désignant par x la chaleur de vaporisation, par p le poids du liquide recueilli dans la boîte R et par c son calorique spécifique :

$$P(\theta - t) = px + pc(T - \theta).$$

Cette expérience comporte des causes d'erreur assez graves. Ainsi le calorimètre peut s'échauffer par le rayonnement du foyer, malgré l'interposition de l'écran F. Une certaine quantité de chaleur peut aussi se propager par l'intermédiaire du col de la cornue. D'autre part, la vapeur n'arrive pas *sèche* dans le serpentin, elle est toujours accompagnée de petites gouttelettes liquides; enfin une partie de la vapeur peut se condenser dans le haut de la cornue et

être entraînée à l'état liquide dans le serpentin. Pour atténuer cette dernière cause d'erreur, on incline le col du côté du foyer, de manière à provoquer l'écoulement du liquide dans la cornue; mais cette précaution peut n'être pas suffisante.

350. Expériences de M. Regnault. — M. Regnault a fait sur la chaleur latente de la vapeur d'eau un très-important travail, en se servant d'un appareil de grandes dimensions où ces diverses causes d'erreur se trouvent éliminées. Il est arrivé aux résultats suivants :

La quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un kilogramme d'eau à 100° à l'état de vapeur sans changement de température est égale à 536 calories.

Dans l'industrie, ce qu'il importe surtout de connaître, c'est la quantité totale de chaleur qui est nécessaire pour produire à la fois et l'élévation de température et la volatilisation. Ainsi, par exemple, étant donné de l'eau à zéro pour la transformer en vapeur à 100°, il faut d'abord 100 calories environ pour élever l'eau à 100°, et 536 pour la volatilisation, ce qui fait un total de 636 calories.

En général, si l'on désigne par Q la quantité totale de chaleur nécessaire pour transformer l'eau à zéro en vapeur à la température T, on a très-exactement

$$Q = 606{,}5 + 0{,}305\,T. \qquad (a)$$

D'ailleurs, d'après ce qui vient d'être dit, on doit avoir entre cette quantité Q et la chaleur de volatilisation à une température T la relation

$$Q = \lambda + T,$$

d'où, en remplaçant Q par sa valeur,

$$\lambda = 606{,}5 - 0{,}695\,T. \qquad (b)$$

La formule (*a*) fait connaître les chaleurs totales aux diverses températures, et la formule (*b*) les chaleurs latentes de vaporisation. Voici le tableau des diverses valeurs données par ces formules de 0 à 230°.

TEMPÉRATURES.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale.	TEMPÉRATURES.	CHALEUR latente.	CHALEUR totale.
0° . . .	606	606	120° . . .	522	642
10. . . .	600	610	130. . . .	515	645
20. . . .	593	613	140. . . .	508	648
30. . . .	586	616	150. . . .	501	651
40. . . .	579	919	160. . . .	494	654
50. . . .	572	622	170. . . .	486	656
60. . . .	565	625	180. . . .	479	659
70. . . .	558	628	190. . . .	472	662
80. . . .	551	631	200. . . .	464	664
90. . . .	544	634	210. . . .	457	667
100. . . .	537	637	220. . . .	449	669
110. . . .	529	639	230. . . .	442	672

Le tableau suivant, emprunté aux travaux de MM. Favre et Silbermann, donne la valeur de la chaleur latente de vaporisation de quelques liquides à la température de leur ébullition.

	TEMPÉRATURE d'ébullition.	CHALEUR latente.		TEMPÉRATURE d'ébullition.	CHALEUR latente.
Esprit de bois. . .	66°,5	264	Acide acétique.. .	120°	102
Alcool absolu. . .	78	208	Acide butyrique. .	164	115
Alcool valérique. .	78	121	Acide valérique. .	175	104
Alcool éthalique. .	38	91	Éther acétique.. .	74	100
Éther.	38	58	Essence de térébenthine. . . .	156	69
Éther valérique. .	113,5	113,5	Essence de citron.	165	70
Acide formique. .	100	169			

351. Chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques. — MM. Favre et Silbermann ont imaginé, pour mesurer la chaleur dégagée dans les actions chimiques, un appareil fort commode. C'est une sorte de gros thermomètre à mercure (fig. 307), dont le réservoir en fer R présente une ou plusieurs cavités cylindriques ou moufles telles que *m*. Ces cavités reçoivent des tubes de verre ou de platine, dans lesquels s'accomplit la réaction chimique. On introduit d'abord l'une des substances, et, à l'aide d'une pipette recourbée qui contient le second liquide en B, on le fait arriver dans le tube. Il

suffit pour cela de soulever la pipette et de la mettre dans la position indiquée par les traits ponctués de la figure.

Supérieurement se trouve une ouverture munie d'un tube contenant un piston en acier P qui pénètre jusque dans la masse de

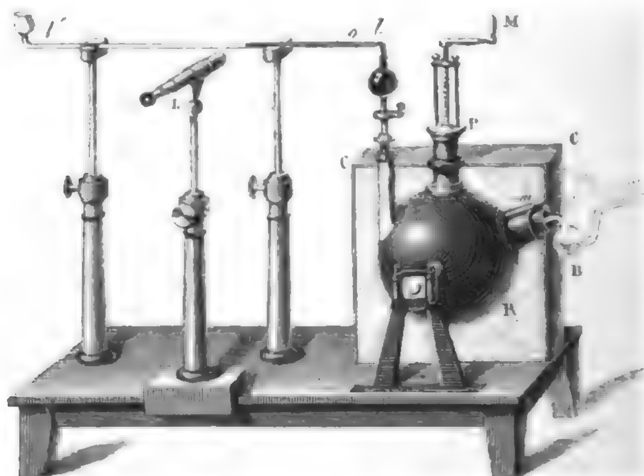


Fig. 307. — Calorimètre de MM. Favre et Silbermann.

mercure et peut être enfoncé plus ou moins à l'aide de la manivelle M. Lorsqu'on veut faire une expérience, on manœuvre le piston jusqu'à ce que le mercure arrive dans la tige tt' jusqu'au zéro; on produit la réaction et on observe le mouvement de la colonne de mercure à l'aide de la lunette L. Pour mesurer la quantité de chaleur qui correspond à ce déplacement, on introduit dans le moufle un poids déterminé d'eau chaude, on la laisse quelque temps, et, d'après son refroidissement, on peut déduire la quantité de chaleur qu'elle a cédé à l'appareil. Cette quantité de chaleur produit un déplacement déterminé d'où il est facile de déduire celle qui correspond à un déplacement quelconque. L'appareil est renfermé dans une boîte remplie de ouate qui le protége contre les effets du rayonnement.

Lorsque la réaction chimique qu'on veut étudier est une combustion, l'appareil doit avoir une disposition différente. MM. Favre et Silbermann ont construit, pour ce genre d'étude, un appareil très-parfait, mais d'une assez grande complication, ce qui nous empêche

de le décrire ici. Nous nous bornons à donner la figure de l'appareil beaucoup plus simple dont s'est servi Dulong dans ses recherches sur le même sujet, et qui suffit pour comprendre la disposition générale des appareils de ce genre.

Il se compose d'une chambre à combustion C placée au centre d'une grande masse d'eau contenue dans le calorimètre D et dans laquelle se meut un agitateur dont la tige est en A. Le combustible, quand il est gazeux, par exemple, arrive par le tube *h* à l'extrémité du bec B, et l'oxygène destiné à le brûler par les tubes *f* ou *p'*. Les produits de la combustion suivent le serpentin *s* et s'échappent à l'extérieur après s'être mis en équilibre de température avec le calorimètre. Cette condition est capitale pour l'exactitude des déterminations, et on s'assure qu'elle est remplie en constatant que le thermomètre *t'*, placé à la sortie de ces produits, est constamment d'accord avec le thermomètre *t* qui accuse la température de l'eau du calorimètre; *p* est un regard fermé par une lame de verre qui permet de suivre les progrès de la combustion. Voici quelques-uns des résultats obtenus par cette méthode.

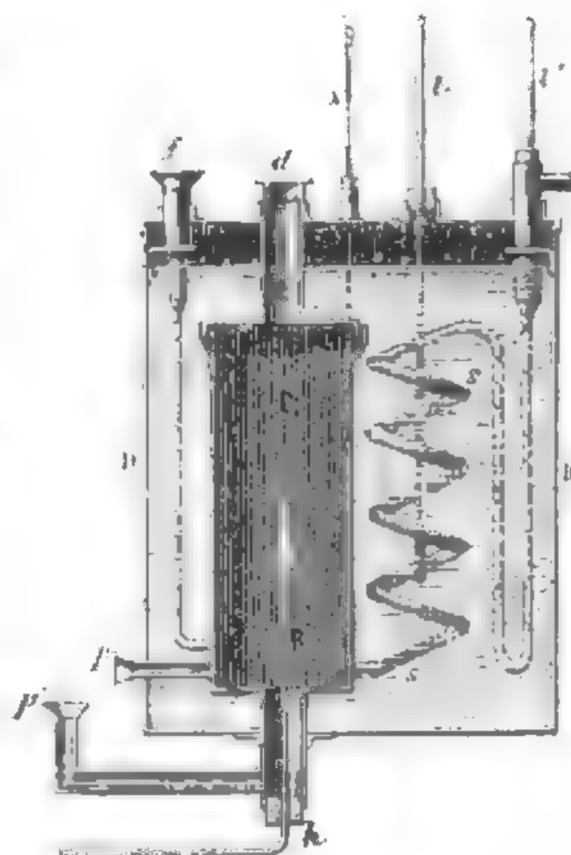


Fig. 308. — Calorimètre de Dulong pour les combustions.

CHALEUR DÉGAGÉE PAR UN GRAMME DE COMBUSTIBLE.

(La calorie est rapportée au gramme.)

Hydrogène	34462	Soufre mou	2258
Hydrogène avec chlore	23783	Sulfure de carbone	3400
Oxyde de carbone	3403	Gaz oléfiant	11857
Gaz des marais	13063	Éther	9028
Charbon de bois	8080	Alcool	7184
Graphite	7797	Acide stéarique	9616
Diamant	7770	Essence de térébenthine	10852
Soufre natif	2261	Huile d'olive	9862

On voit que de tous les combustibles l'hydrogène est à beau-

coup près celui qui possède la plus grande puissance calorifique. On s'explique ainsi les résultats très-intenses qu'on a pu obtenir avec le chalumeau à gaz oxygène et hydrogène, appareil dans lequel ce dernier gaz est complétement brûlé à l'extrémité d'un tube annulaire par l'oxygène qu'amène un second tube central.

352. Chaleur animale. — Les animaux sont le siége de différents phénomènes chimiques dont le résultat évident est la production d'une certaine quantité de chaleur; c'est ainsi, par exemple, que du carbone est converti en acide carbonique, de l'hydrogène en eau. A côté de ces réactions il en est d'autres qui ont un résultat inverse, et, dans l'état actuel de la science, il est difficile d'établir un rapport précis entre l'action résultante et la quantité de chaleur effectivement produite. Cette dernière se mesure d'ailleurs par des méthodes tout à fait semblables qui ont été exposées précédemment.

L'animal est placé dans une sorte de cage d'osier (fig. 309), placée elle-même dans l'intérieur d'une boîte en cuivre suspendue au centre de la masse d'eau du calorimètre. L'air, chassé par un gazomètre, arrive par un tube convenable, et les produits de la respiration, après avoir circulé dans le serpentin, sortent par un second tube et se rendent dans un second gazomètre où on peut les recueillir et les étudier.

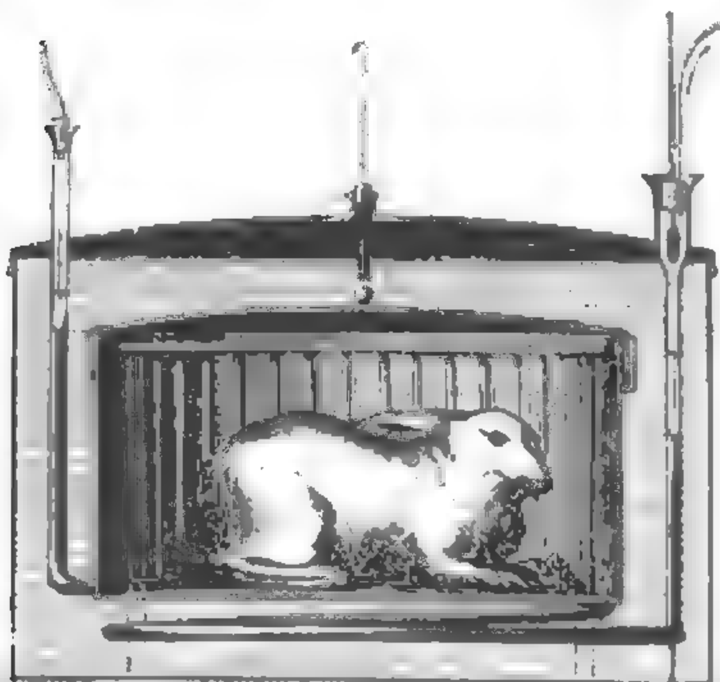


Fig. 309.

C'est à la chaleur produite par les diverses réactions dont le corps des animaux est le siége qu'il convient d'attribuer leur température intérieure sensiblement constante. Cette constance n'est pas absolue, mais les variations sont toujours contenues dans des limites très-étroites. Il y a d'ailleurs, sous ce rapport, des différences considérables dans les diverses classes d'animaux, ainsi que le montre le tableau suivant.

MAMMIFÈRES.

	Degrés.
Singe	39,7
Chauve-souris	37,8
Écureuil	38,8
Lièvre	37,8
Tigre	37,2
Chien	39
Chat	38,3
Cheval	37,5
Mouton	39,3
Bœuf	39
Porc	40,5
Éléphant	37,5

OISEAUX.

Chat-huant	40
Perroquet	41,1
Grive	42,8
Moineau	42,1
Pigeon	43
Poule commune	42,5
Coq adulte	43,9
Coq d'Inde	42,7
Canard commun	43,9

REPTILES.

	Degrés.
Tortue	28,9
Serpent	31,4
Grenouille	25

POISSONS.

Requin	25
Truite	14
Poisson volant	25,5

MOLLUSQUES.

Huître	27
Limaçon	24

CRUSTACÉS.

Écrevisse	26
Crabe	22

INSECTES.

Ver luisant	23,3
Grillon	22,5
Guêpe	24,4
Scorpion	25,3

CHAPITRE XXXII.

THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

353. Sources de chaleur. — Tout le monde sait ce qu'est une source de chaleur : c'est un système susceptible d'échauffer l'air ambiant ou les corps voisins sans que sa propre température diminue, et cela pendant tout le temps que se produit dans ce système un phénomène particulier qui caractérise précisément la source. Ainsi dans un foyer où l'on brûle du charbon, tant que le combustible dure, tant que la combustion continue, il y a production non interrompue de chaleur.

En dehors des radiations solaires, qui sont évidemment la source de chaleur la plus importante à la surface de notre globe, celle à laquelle sont subordonnés de la façon la plus étroite et la vie et le développement des êtres organisés, c'est à la combustion que nous empruntons toute la chaleur nécessaire aux besoins de l'économie domestique, de l'industrie ou des arts. La combustion est un phénomène chimique, c'est la combinaison de l'oxygène, *corps comburant*, avec un autre corps appelé *combustible*. Théoriquement et au point de vue de la chimie pure, les corps combustibles sont très-nombreux; dans la pratique on n'utilise guère que des substances assez complexes d'ailleurs, mais dans lesquelles on rencontre toujours en proportion plus ou moins dominante l'hydrogène et surtout le carbone. Cette dernière substance existe même presque seule dans certains combustibles tels que le charbon de bois et le charbon de pierre (anthracite). Les puissants effets calorifiques que l'on tire du courant électrique sont dus à une cause

analogue; nous verrons, en effet, plus tard que c'est à l'oxydation du zinc de la pile, c'est-à-dire à sa combustion, qu'ils doivent être attribués.

La question des sources de chaleur a toujours beaucoup préoccupé les savants, non pas seulement au point de vue de la pratique, mais encore et plus particulièrement même au point de vue de la doctrine. Il semble, en effet, qu'il y ait ici une sorte de création de chaleur, et par suite de force, et c'est là évidemment une idée entièrement inadmissible. Il s'agissait donc de trouver quelle est, en réalité, la modification physique à laquelle est due l'apparition de la chaleur, quelle est la force dont celle-ci est une transformation. C'est à des spéculations de ce genre que se rattache, au moins en partie, ce que l'on appelle la théorie mécanique de la chaleur. Cette théorie est déjà arrivée à un degré remarquable de consistance et de précision; elle est inévitablement appelée à prendre une extension de plus en plus grande, c'est pour cela que nous essayerons d'en donner ici une idée succincte.

354. Relation entre la chaleur et le travail mécanique. — Il est évident qu'avec de la chaleur on peut produire du travail; tout celui qu'accomplissent les machines thermiques (machines à vapeur, machines à air dilaté, etc.) n'a pas d'autre origine. Nous pouvons d'ailleurs le concevoir par une expérience des plus simples : prenons le briquet à air et supposons que, le piston étant dans une position quelconque, on vienne à chauffer l'air qui est au-dessous de lui; cet air se dilatera, le piston, qui a un certain poids, se déplacera d'une certaine quantité : il y aura donc un travail accompli.



Fig. 310. Briquet à air.

Réciproquement, avec du travail on peut produire de la chaleur. Si, par exemple, dans la partie creuse du piston nous plaçons un fragment d'amadou ou de fulmi-coton, en comprimant brusquement l'air contenu dans l'appareil, il y a un développement de chaleur assez considérable pour déterminer l'inflammation de ces corps. C'est pour cela que l'instrument a été nommé briquet à air. Les anciens physiciens don-

naient de cette expérience une explication qui peut paraître aujourd'hui singulière. Ils supposaient que la chaleur ou le *calorique* est une sorte de fluide impondérable qui s'introduit dans les corps et produit à la fois un accroissement de volume et une élévation de température. Si donc on vient à comprimer un corps, le calorique qui avait servi à le dilater est pour ainsi dire *exprimé* : de là la production de chaleur. De cette théorie résulte inévitablement cette conséquence, que le calorique qui se trouve dans un système de corps forme une masse déterminée, et que dès lors il ne peut augmenter de quantité dans l'un d'eux qu'autant qu'il se produit un phénomène inverse dans un autre. Or il y a des cas dans lesquels on voit dans des corps en contact se produire de la chaleur sans qu'il soit possible d'apercevoir le phénomène inverse qui correspond à cette production ; c'est ce qui a lieu, par exemple, dans le frottement.

355. Chaleur développée par le frottement. — Le frottement est une source de chaleur bien connue. Les sauvages, dit-on, se

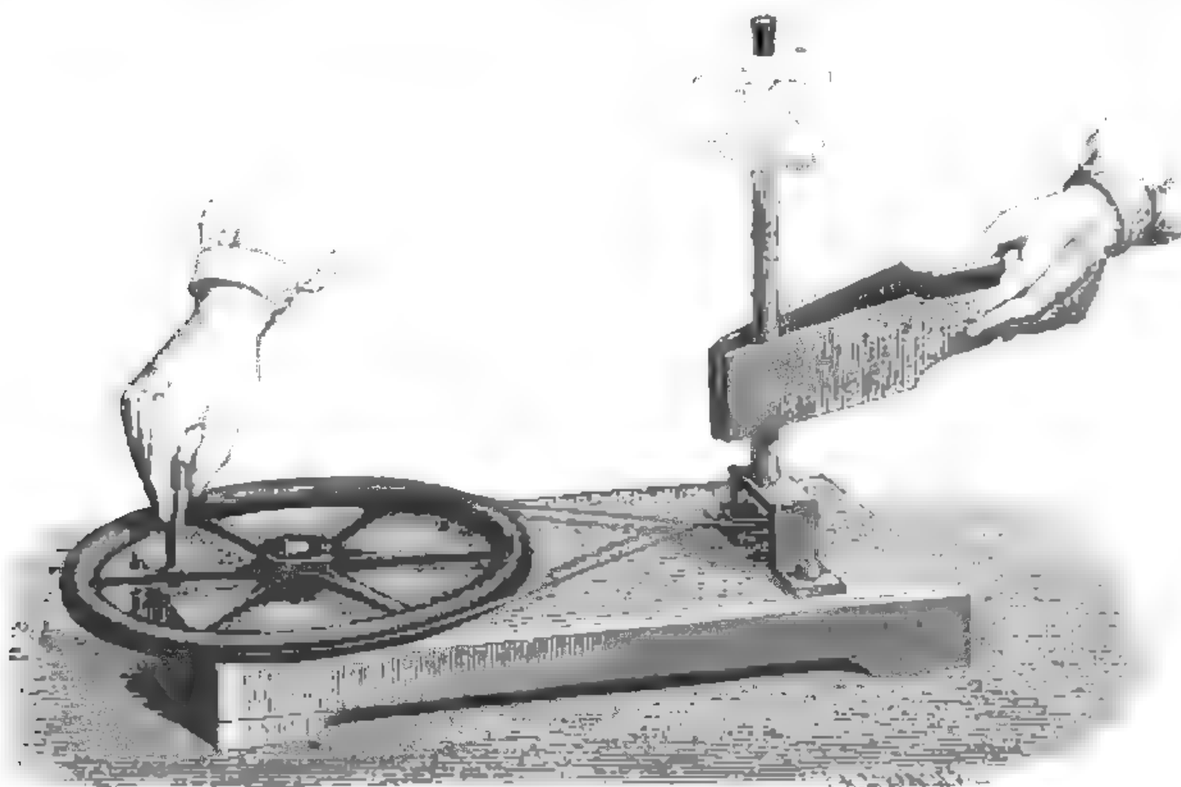


Fig. 311. — Chaleur dégagée par le frottement.

procurent du feu en frottant deux morceaux de bois sec l'un contre l'autre. Le frottement des essieux de voiture ou de wagon contre les roues donne lieu à un échauffement qui pourrait produire les plus graves accidents si on n'en diminuait l'intensité par l'interposition de corps gras.

On peut, dans les cours de physique, rendre sensible la cha-

leur que développe le frottement à l'aide de l'expérience suivante, imaginée par M. Tyndall :

Un tube de verre, contenant de l'eau (fig. 311), et fermé par un bouchon, peut recevoir un mouvement de rotation rapide autour de son axe. Pendant son mouvement, on le presse avec une pince en bois, recouverte de cuir. L'eau s'échauffe graduellement, elle finit par atteindre le point d'ébullition, et à un certain moment le bouchon est projeté, suivi d'un jet abondant de vapeur. Lorsqu'on frotte deux corps il se produit donc un phénomène calorifique qui peut être fort intense, et l'on ne voit aucun autre corps dont le refroidissement corresponde à la chaleur développée.

Au commencement de ce siècle, Rumford avait étudié avec beaucoup de soin la chaleur développée dans le tournage d'une pièce de canon; il avait reconnu que cette chaleur est énorme, et avait été conduit à renoncer à l'idée de la matérialité du calorique. Mais les partisans de cette hypothèse supposaient que la capacité calorifique de la matière pulvérisée est moindre que celle de la matière solide; dès lors on concevrait que l'excès de chaleur nécessaire pour porter à la même température le métal sous son état primitif est précisément celle qui apparaît dans l'opération mécanique. Mais cette supposition est entièrement gratuite, il n'y a pas de différence sensible, appréciable, entre la capacité calorifique du métal agrégé et celle du métal en poudre. D'ailleurs, une expérience célèbre sur cette question met à néant cette explication d'une façon tout à fait décisive. Davy imagina de frotter l'un contre l'autre deux morceaux de glace, et il reconnut que la glace fondait par le frottement. Or, bien loin que la capacité calorifique de l'eau soit plus faible que celle de la glace, elle est beaucoup plus considérable.

Il faut donc nécessairement avoir recours à un ordre d'idées tout différent pour se rendre compte de la production de la chaleur par le frottement. Or, pour produire le mouvement du corps frottant sur le corps frotté, il faut évidemment développer, consommer une certaine quantité de travail; c'est ce travail qui reparaît sous forme de chaleur. Les deux phénomènes sont donc non-seulement deux choses corrélatives pouvant naître l'une de l'autre, ce sont

deux choses équivalentes, dont l'une est la transformation de l'autre; d'un côté un mouvement mécanique ordinaire qui peut engendrer en se détruisant le mouvement moléculaire spécial qui constitue la chaleur, de même que ce dernier peut se transformer en travail mécanique ordinaire.

356. Expérience de Foucault. — Nous verrons plus tard, en étudiant les propriétés calorifiques du courant électrique, des exemples précis de cette dernière transformation; quant à la première, elle se trouve réalisée d'une façon des plus ingénieuses dans une expérience de Foucault, que l'on peut considérer comme une de celles qui font le mieux ressortir le génie inventif de l'auteur. Nous la décrivons ici, bien qu'elle repose sur des phénomènes électriques qui ne seront étudiés que plus tard.

L'appareil se compose (fig. 312) d'un disque de cuivre rouge qui peut recevoir, d'un système de roues d'engrenage, un mouvement de rotation extrêmement rapide. L'appareil est construit avec une grande perfection, et il suffit d'une très-petite force pour entretenir le mouvement. Le disque tourne entre deux plaques de fer qui sont les armatures d'un de ces aimants temporaires qu'on obtient par le passage d'un courant et que l'on nomme des électro-aimants. Or si, pendant que l'on fait tourner le disque avec un effort très-faible, on vient à faire passer le courant, les plaques de fer s'aimantent, et il en résulte entre elles et le disque une action qui provient de courants développés sur ce dernier. A partir de ce moment on éprouve une résistance très-marquée et on est obligé de développer un effort considérable pour entretenir le mouvement de rotation. Si l'expérience se prolonge pendant deux ou trois minutes, on aura développé un travail considérable, mais ce travail se retrouve sous une autre forme. Le disque s'est échauffé de 50 à 60°. Ce phénomène calorifique est évidemment la transformation du travail nécessité pour mettre l'appareil en mouvement.

On peut donner à cette expérience une forme encore plus instructive au point de vue qui nous occupe. Rétablissons le disque dans son état primitif, puis, lorsqu'il aura été mis en mouvement avec une très-grande vitesse et abandonné à lui-même, faisons

passer le courant; si celui-ci est assez intense, le disque s'arrête subitement, et on peut constater que sa température s'élève.

Dans la première expérience l'élévation de température a pu être rendue très-sensible par le fait même de la prolongation du

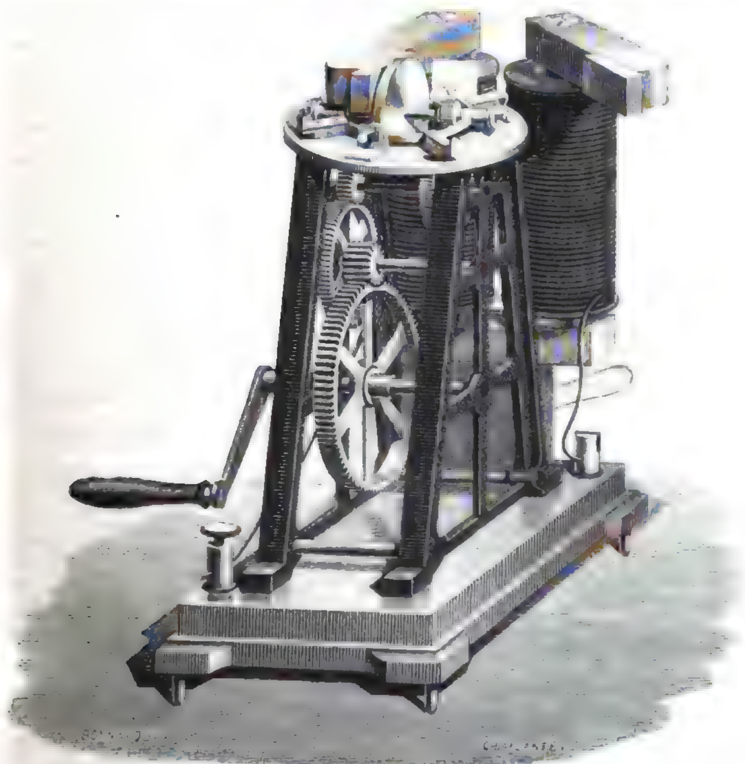


Fig. 312. — Appareil de M. Foucault.

phénomène et de l'accumulation du travail; dans la seconde il y a aussi élévation de température, mais elle est beaucoup plus faible et il faut une disposition spéciale d'expérience pour la mettre en évidence.

Quoi qu'il en soit, nous pouvons conclure que lorsqu'un corps en mouvement s'arrête, il y a élévation de température. Or, pour mettre un corps en mouvement, il faut faire agir une force pendant un certain temps, c'est-à-dire produire du travail : ce travail est représenté par le mouvement lui-même, qui en est, pour ainsi dire, la forme sensible.

Cette élévation de température, qui est très-faible dans le cas de l'expérience précédente, serait très-considérable au contraire si le corps en mouvement avait une grande masse, et si la vitesse de rotation était elle-même très-considérable [1].

Si on imagine, par exemple, que la terre vienne à cesser de se mouvoir dans son orbite, ce phénomène, auquel on pourrait au premier abord ne pas attacher de conséquence bien précise, serait accompagné d'une prodigieuse élévation de température; c'est par milliers de degrés qu'il faudrait la compter, il y aurait de quoi fondre le globe, le volatiliser et en disséminer les éléments dans l'espace.

357. Équivalent mécanique de la chaleur. — Puisque le travail et la chaleur peuvent se transformer l'un dans l'autre, il est naturel de chercher quelle est la quantité de chaleur qu'il faut employer pour produire une quantité de travail déterminée, ou réciproquement. M. Joule a fait cette détermination de la manière suivante : Son appareil se compose (fig. 313) d'un arbre vertical sur lequel se trouvent implantées des palettes. Cet arbre est placé dans un calorimètre à eau et peut être mis en mouvement par un poids

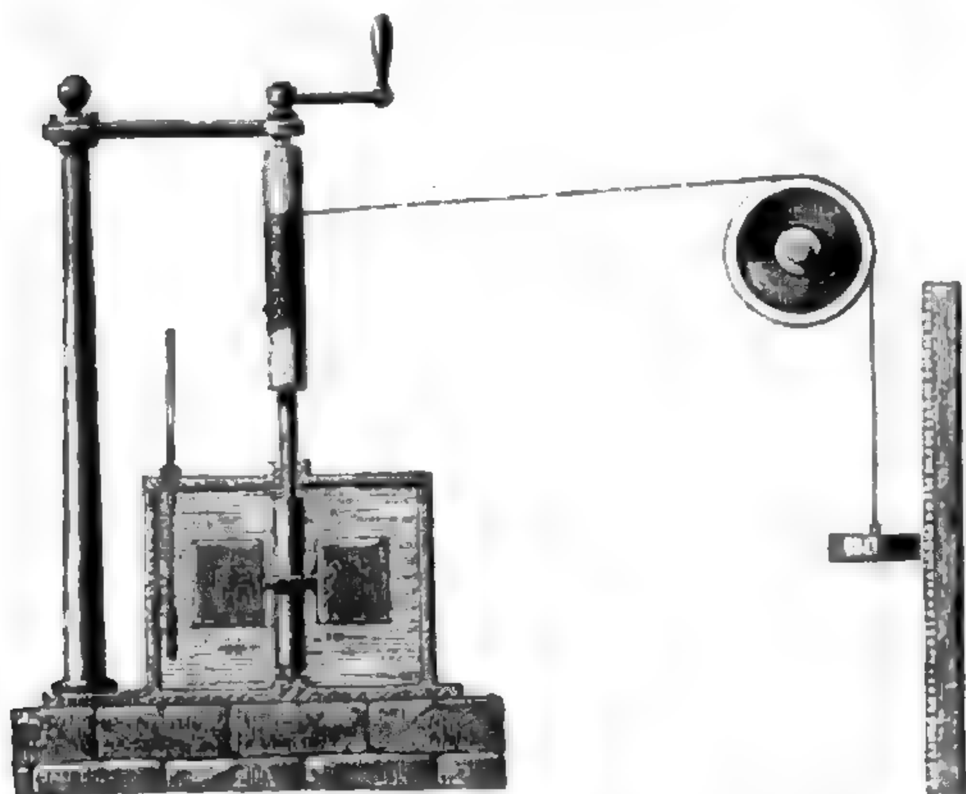


Fig. 313. — Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.

1. Il est facile de calculer *à priori* cette élévation de température. En effet, si v est la vitesse du corps considéré, le travail produit par la force qui l'a mis en mouvement est, comme on le démontre en mécanique, $\frac{1}{2}mv^2$, m désignant la masse du corps. Or on verra plus loin qu'une calorie est l'équivalent d'un travail égal à 425 kilogrammètres; donc la chaleur produite exprimée en calories sera $\frac{1}{2}mv^2 : 425$. Si on appelle p le poids du corps, c son calorique spécifique et x l'élévation de température, on devra avoir la relation $\frac{1}{2}mv^2 : 425 = pcx$, d'où on déduira x.

passant sur une poulie. Le poids est abandonné à lui-même et parcourt sous l'action de la pesanteur un certain espace qui correspond à un travail déterminé. Quant à la quantité de chaleur, elle est donnée par l'élévation de température du calorimètre. M. Joule a trouvé par cette expérience qu'une quantité de chaleur égale à une calorie correspond à un travail de 425 kilogrammètres. C'est ce nombre que l'on appelle l'*équivalent mécanique de la chaleur*.

Remarquons qu'on peut faire appel, pour déterminer ce coefficient, à des phénomènes divers, tant pour la production de la chaleur que pour la manière dont elle se transforme en force motrice. Le résultat est toujours le même, aux erreurs inévitables d'expérience près. Il n'y a donc pas en physique de proposition plus solidement établie que celle-ci : *A une dépense de travail égale à 425 kilogrammètres correspond une production de chaleur égale à une calorie, et réciproquement, pour une calorie dépensée, il y a 425 kilogrammètres de travail produit.*

Partout donc, lorsque du travail sera absorbé, il y aura production de chaleur ou production d'un nouveau travail, mais la somme du nouveau travail et de la chaleur produite est toujours égale au travail primitif. Ainsi, par exemple, dans la machine qui sert à frapper les médailles, lorsque le coin arrive armé d'une certaine vitesse, il se produit un double phénomène : d'abord, impression sur la médaille, c'est un travail qu'il est facile de concevoir, quoique d'une évaluation difficile ; en second lieu, la pièce s'échauffe. Réunissons la quantité de travail effectué par le coin à celui que représente, à raison de 425 kilogrammètres par calorie, la chaleur produite, et nous aurons une somme égale au travail employé pour mettre le balancier en mouvement.

Lorsque, dans l'essai d'une plaque de blindage, on tire sur elle un boulet, il peut arriver que le boulet perce la plaque; si la plaque n'est pas percée, le phénomène mécanique est moindre, mais est compensé par une production de chaleur plus intense, le boulet s'échauffe jusqu'au rouge. La transformation de la chaleur en travail ou réciproquement, suivant une mesure déterminée et *invariable*, telle est l'essence de ce qu'on appelle la théorie mécanique de la chaleur, théorie qui ne soulève aujour-

d'hui aucune contradiction sérieuse. Nous allons en indiquer quelques applications.

358. Applications à la machine à vapeur. — On appelle en général *machines thermiques* les machines dans lesquelles la force motrice est empruntée à l'action de la chaleur; parmi elles, la machine à vapeur occupe incontestablement le premier rang; nous la décrirons en détail dans le chapitre suivant. Elle se compose essentiellement d'un cylindre appelé *corps de pompe*, dans lequel se meut un piston. La vapeur, arrivant alternativement d'un côté et de l'autre de ce piston, détermine un mouvement de va-et-vient susceptible d'être transformé d'une manière quelconque.

On peut calculer avec la plus grande exactitude la quantité de chaleur nécessaire pour la production de la vapeur à l'origine de la machine. On peut calculer aussi celle qui serait nécessaire pour produire la vapeur dans l'état où elle se trouve quand elle sort de l'appareil. Pendant longtemps on a cru que ces deux quantités étaient égales; il n'en est rien, la première de ces quantités est supérieure à la seconde ; il y a donc destruction d'une certaine quantité de chaleur, mais à sa place se trouvent et le travail effectué par la machine et celui que consomment les organes accessoires qui constituent le mécanisme.

359. Application à la chaleur animale. — Lavoisier a fait voir le premier que les animaux peuvent être assimilés à des sortes de machines vivantes, dans lesquelles la chaleur s'entretient par diverses réactions chimiques, combustion du charbon, de l'hydrogène, etc.; l'ensemble de ces réactions constitue le phénomène de la respiration. Quand l'animal est au repos, il y a équilibre entre la chaleur produite et celle qui se perd par échange avec l'extérieur; mais s'il exécute un travail quelconque, il doit y avoir disparition de chaleur. Cette idée paraît étrange au premier abord, car l'accroissement de chaleur chez l'homme qui travaille est une chose incontestable. Mais il faut remarquer que lorsqu'on travaille la respiration s'accélère; or, si l'on tient compte du charbon brûlé dans le cas du travail et dans le cas du repos, on peut constater que dans le premier cas la même quantité de charbon a produit une chaleur moindre; la portion qui manque est l'équivalent du travail produit.

Ceci a été démontré par une curieuse expérience de M. Hirn. Il a enfermé un homme dans un calorimètre analogue à celui qui a été décrit (352), ce qui lui a permis de mesurer à la fois et la chaleur produite et la quantité d'acide carbonique exhalé. Dans une première expérience, l'homme était au repos; dans une seconde, il s'élevait sur une roue mobile et par conséquent il effectuait un travail mécanique; or la quantité d'acide carbonique exhalé dans le second cas est plus forte, mais elle donne lieu à une production de chaleur proportionnellement moindre. On peut donc conclure que dans les animaux la puissance motrice, le mouvement musculaire, sont au même titre que dans les machines thermiques la représentation d'un phénomène calorifique.

360. Chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques. — Les principes de la théorie mécanique de la chaleur permettent de se faire une idée rationnelle de la cause de la chaleur dégagée dans les combinaisons chimiques. Les molécules des corps qui se combinent obéissent à des forces attractives moléculaires, il y a donc un certain travail effectué que l'on retrouve sous la forme calorifique. Dans le cas d'une décomposition, il faut surmonter l'affinité et séparer les molécules soumises à leur attraction; il faut pour cela, ou effectuer un travail proprement dit, ou dépenser une quantité équivalente de chaleur. Il est évident d'ailleurs, et cela résulte des expériences de MM. Favre et Silbermann, que la quantité de chaleur qui se dégage dans la formation d'un composé est exactement égale à celle qu'il faut employer pour en effectuer la décomposition.

361. Chaleur solaire. — La quantité de chaleur due aux radiations solaires est extrêmement considérable. M. Pouillet a essayé de la mesurer à l'aide d'un appareil appelé *pyrhéliomètre*. Il se compose (fig. 314) d'un cylindre plat, de cuivre ou d'argent, mince, plein d'eau et servant de calorimètre. Dans ce cylindre est logé le réservoir d'un thermomètre dont la tige est engagée dans le tube évidé qui sert de support au cylindre. En arrière du cylindre se trouve un disque de même diamètre et placé parallèlement, qui permet d'orienter l'appareil de façon que les rayons arrivent perpendiculairement à la surface du cylindre; celle-ci est d'ailleurs noircie

pour que son pouvoir absorbant soit le plus grand possible. Voici la manière d'opérer. On place le pyrhéliomètre à l'ombre pendant cinq minutes et on observe son échauffement ou son refroidissement; supposons, par exemple, que ce soit un refroidissement de θ degrés; on le place ensuite cinq minutes au soleil et on note l'échauffement T; enfin on le reporte à l'ombre et on trouve qu'en cinq minutes il se refroidit de θ' degrés. On conclut de là que l'échauffement propre produit par le soleil est sensiblement égal à $T + \frac{\theta + \theta'}{2}$, et, par conséquent, la quantité de chaleur, en appelant P la valeur en eau du calorimètre, est $P\left(T + \frac{\theta + \theta'}{2}\right)$. Cette expression ne représente que la quantité de chaleur reçue par le pyrhéliomètre; il faudrait y ajouter, pour avoir l'effet total, la portion qui a été absorbée par l'atmosphère. En comparant les résultats obtenus aux diverses heures de la journée, pour lesquelles l'épaisseur de l'atmosphère traversée est très-différente, M. Pouillet en a déduit une formule empirique qui permet de tenir compte de l'absorption atmosphérique et qui l'a conduit finalement au résultat suivant : *La quantité de chaleur envoyée annuellement par le soleil à la terre serait capable de fondre à la surface de celle-ci une couche de glace de 30 mètres d'épaisseur.*



Fig. 314. — Pyrhéliomètre.

Ce n'est là qu'une très-minime partie de la chaleur émise par le soleil, puisque la terre n'occupe évidemment qu'une bien petite étendue de l'espace dans lequel a lieu le rayonnement; la quantité totale de chaleur émise est 2 ou 3 milliards de fois celle que la terre reçoit.

On a dû naturellement se demander quelle est l'origine de cette chaleur; quel est le phénomène qui l'entretienne à un degré de température sensiblement constant, car depuis les temps historiques on n'a pas observé de variation appréciable dans la température du globe terrestre. Diverses hypothèses ont été émises à ce

sujet : mais aucune ne soutient l'examen. La théorie mécanique de la chaleur en a suggéré une qui a quelque chose de plus plausible. Elle consiste à admettre qu'il se précipite continuellement à la surface du soleil de la matière cosmique (comètes, aérolithes) ; la vaste nébulosité circumsolaire, connue sous le nom de *lumière radiale*, serait dans cette hypothèse un réservoir de matière, qui, venant successivement se condenser sur le soleil, entretiendrait, par le choc qui doit nécessairement en résulter, la température invariable de cet astre. M. William Thomson, l'auteur de cette hypothèse, s'est livré sur ce point à des calculs approximatifs d'après lesquels un accroissement très-lent du soleil permettrait d'expliquer la régénération de la quantité de chaleur dont les expériences pyrhéliométriques constatent la perte. Ainsi, suivant lui, la couche de matière cosmique déposée à la surface du soleil en quatre mille ans n'accroîtrait pas le diamètre apparent de l'astre de $\frac{1}{10}$ de seconde.

CHAPITRE XXXIII.

MACHINES THERMIQUES.

362. Machines thermiques. — On désigne sous le nom de machines thermiques des machines dans lesquelles on produit de la force motrice en dépensant une certaine quantité de chaleur. La plus importante de ces machines est, sans contredit, la machine à vapeur; mais il en existe d'autres, telles que les machines à air chaud, les machines à gaz; nous verrons même plus tard que les machines électro-motrices sont aussi de véritables machines de ce genre. Nous allons décrire d'abord une machine à air dilaté, parce que la conversion de la chaleur en travail s'y montre d'une manière très-nette, et parmi ces appareils nous choisirons la machine de M. Laubereau, dont l'invention a certainement pour origine les idées actuellement en cours sur la nature de la chaleur.

363. Machine de M. Laubereau. — La machine de M. Laubereau est représentée dans les deux figures 315 et 316. L'une en est une vue perspective, l'autre est une coupe faite suivant les axes des pistons. Elle se compose de deux cylindres d'inégal diamètre et communiquant l'un avec l'autre. Le grand cylindre est divisé en deux compartiments par une sorte de gros piston en plâtre, qui toutefois ne touche pas les parois du corps de pompe et laisse par conséquent, d'une manière permanente, une communication annulaire entre les deux compartiments.

La base inférieure du cylindre est légèrement concave et reçoit l'action du foyer; la base supérieure est munie d'un double fond, dans lequel circule continuellement de l'eau froide amenée par une

pompe qui reçoit son mouvement de la machine elle-même. Il résulte de cette disposition que, quand la masse de plâtre sera à la partie inférieure, elle interceptera par sa mauvaise conductibilité l'action du foyer, et l'air se trouvera refroidi par le double fond.

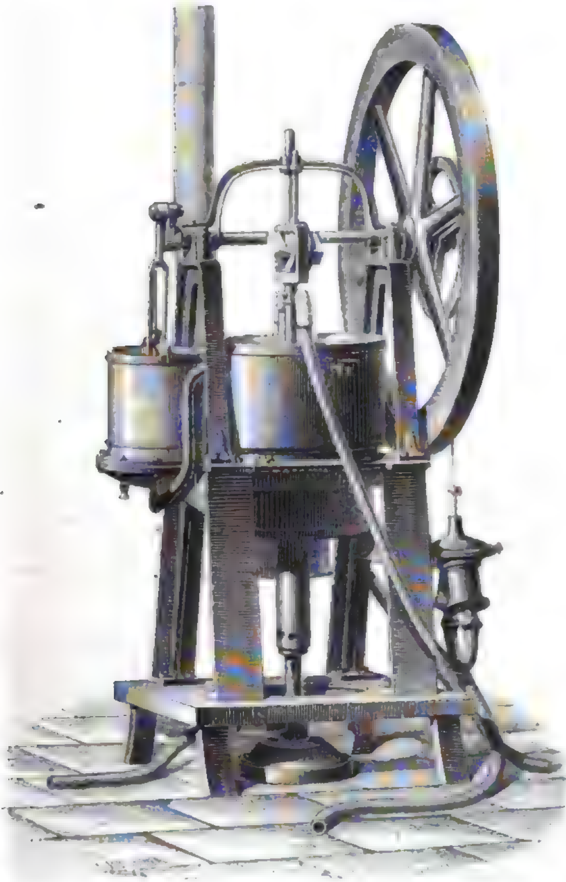


Fig. 315. — Machine de M. Laubereau. Vue perspective.

Au contraire, quand elle sera en contact avec le réfrigérant, l'air éprouvera l'action du foyer et par suite sa force élastique augmentera.

Le petit cylindre est ouvert à sa partie supérieure; il contient un piston dont la tige est liée par l'intermédiaire d'une bielle à une partie coudée de l'arbre, à l'extrémité duquel se trouve un

volant massif en fonte. La communication avec le grand cylindre se fait par sa partie inférieure.

Supposons d'après cela que, le grand piston étant contre le réfrigérant, le petit piston soit au bas de sa course. L'air subissant alors l'action de la chaleur agira sur le petit piston et le soulèvera. Si alors on imagine que le grand piston se trouve en bas, l'air sera refroidi, sa force élastique diminuera, deviendra à peu près égale à celle de l'atmosphère et pourra être même un peu plus petite; le petit piston dès lors lancé par l'action du volant redescendra pour recommencer son même mouvement, si l'on suppose qu'on replace le piston en plâtre à la partie supérieure.

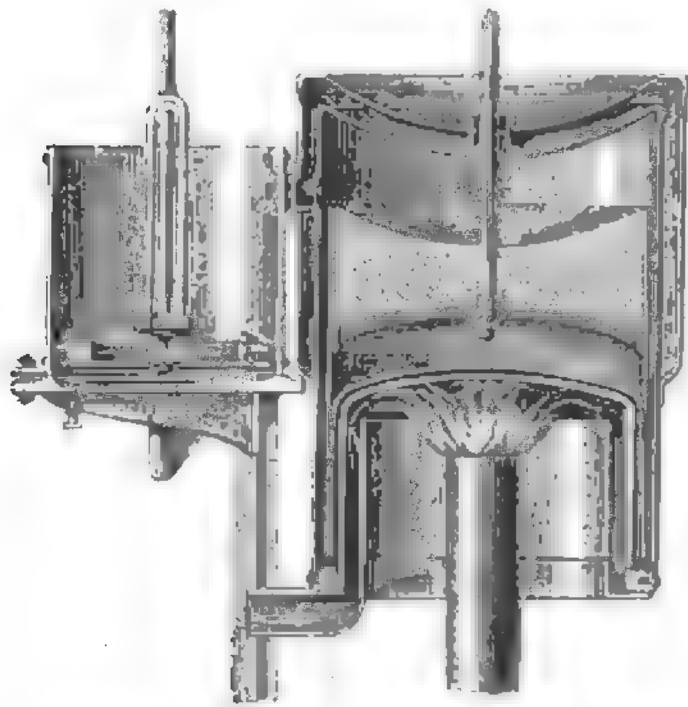


Fig. 310. — Machine de M. Laubereau. Coupe suivant les axes des pistons.

Ce mouvement du grand piston s'obtient, comme le montre la figure, par le jeu d'un excentrique situé sur l'arbre de la machine.

La machine de M. Laubereau est surtout destinée à la petite industrie. Les machines thermiques en général ne peuvent, suivant la théorie, donner de résultats avantageux qu'à la condition que la *chute de la chaleur* soit très-grande, c'est-à-dire que la différence de température à l'entrée et à la sortie soit très-considérable. Comme pratiquement on ne peut guère prendre l'air froid au-dessous de la température ambiante, cela revient à dire qu'il faut chauffer l'air à une très-haute température. Mais alors les métaux s'oxydent et s'usent avec une telle rapidité que la machine devient à peu près impossible. C'est pour cette cause que les machines à air chaud ne sont que très-rarement construites pour la production d'une grande force motrice.

364. Machine à vapeur. — Historique. — La connaissance des propriétés physiques de la vapeur d'eau et l'idée d'utiliser sa force motrice remontent à la fin du XVII[e] siècle, époque à laquelle se

placent les travaux d'Otto de Guericke et de Torricelli sur le poids et la pression de l'air.

C'est à Denis Papin, savant français, né à Blois en 1650, mort en 1710, que sont dus les premiers essais sur l'utilisation de la vapeur comme force motrice. L'appareil qu'il avait imaginé consistait dans un cylindre ouvert par le haut, contenant un peu d'eau à sa partie inférieure et un piston au-dessus. En chauffant l'eau, on la réduisait en vapeur qui soulevait le piston; en la laissant ensuite refroidir, la vapeur perdait presque tout son ressort, et le piston pressé par l'atmosphère redescendait. On obtenait ainsi un mouvement de va-et-vient susceptible, ainsi que Papin le remarque lui-même, d'être transformé en un mouvement de rotation, et par conséquent d'être appliqué à un travail mécanique quelconque.

La description de la machine de Papin est consignée dans un recueil scientifique de Leipsick (*Acta eruditorum*) qui porte la date de 1690.

En 1715, Newcomen construisit, sous le nom de *machine atmosphérique*, la première machine à vapeur qui ait réellement fonctionné industriellement. Elle est au fond très-semblable à celle de Papin, avec de notables améliorations toutefois. L'une des plus importantes consiste dans la séparation de la chaudière où se forme la vapeur d'avec le corps de pompe. D'autre part, pour produire le refroidissement de la vapeur et amener par la destruction de sa force élastique le mouvement descendant du piston, Newcomen eut l'idée de faire arriver de l'eau froide à la partie inférieure du corps de pompe; de cette façon le refroidissement est pour ainsi dire instantané, et le mouvement de va-et-vient du piston peut être rendu assez rapide pour pouvoir être utilisé industriellement. La machine atmosphérique se répandit en effet beaucoup, et fut surtout appliquée à faire mouvoir les pompes destinées à l'épuisement des mines.

Avant l'invention de la machine atmosphérique, vers 1698, Savery avait construit une machine dans laquelle la force élastique de la vapeur est appliquée à l'élévation de l'eau. Elle se compose essentiellement d'une chaudière en communication avec le tuyau d'ascension. Lorsque, par l'action de la chaleur, la force élastique

de la vapeur a pris un accroissement suffisant, l'eau se trouve refoulée dans le tuyau et peut parvenir ainsi à une hauteur d'autant plus considérable que la température est plus élevée. En réalité, ce n'est pas là une machine motrice, c'est une opération particulière réalisée par l'action de la vapeur, tandis que le mécanisme imaginé par Papin, à une époque d'ailleurs antérieure, constitue une source de mouvement applicable à toute sorte d'opérations.

Dans la machine de Savery il y avait deux chaudières jumelles; quand l'une se vidait, l'autre se remplissait. Pour obtenir ce dernier résultat, Savery faisait communiquer les chaudières avec un réservoir d'eau froide à l'aide d'un tuyau. Lorsque la chaudière vide se refroidissait, la tension de la vapeur diminuait graduellement et l'excès de la pression atmosphérique déterminait l'ascension de l'eau dans le tube et par suite le remplissage de la chaudière. Cette destruction de la force élastique de la vapeur par le refroidissement est la conception essentiellement originale de Papin. L'inventeur de la machine atmosphérique l'emprunta à Savery et c'est pour cela que le nom de ce dernier savant est souvent associé à celui de Newcomen.

Watt, né a Greenock (Écosse) en 1736, mort en 1819, qui a porté la machine à vapeur à un si haut degré de perfection, débuta dans cette carrière par un perfectionnement important apporté à la machine de Newcomen. La condensation de la vapeur faite dans le corps de pompe avait beaucoup d'inconvénients, notamment celui de refroidir les parois du cylindre et de donner lieu ainsi à une perte considérable de chaleur. Watt reconnut que la condensation pouvait se faire dans un vase séparé communiquant seulement par un tube avec le corps de pompe; il donna à ce vase le nom de *condenseur*. A ce premier perfectionnement, qui réalisait déjà une énorme économie de combustible, Watt en ajouta un second non moins important. Il consiste à remplacer la pression atmosphérique, qui dans la machine de Newcomen fait descendre le piston, par l'action même de la vapeur. Quant au mouvement ascendant, il est produit par un contre-poids dont l'effet se fait sentir lorsque la vapeur, par le jeu d'un mécanisme convenable, s'est répandue de part et d'autre du piston, au moment où celui-ci a atteint la partie

inférieure de sa course. Grâce à ces deux perfectionnements, à une amélioration d'ailleurs notable de toutes les parties accessoires, la machine de Watt remplaça à peu près partout la machine atmosphérique. C'est la machine dite à simple effet, parce que la vapeur ne produit que l'un des mouvements du piston. Cette machine, dont il existe encore des modèles, perfectionnés d'ailleurs, dans le Cornwall, se prête difficilement aux transformations de mouvement. Watt ne tarda pas à perfectionner l'appareil en faisant produire à la fois le mouvement ascendant et descendant du piston par l'action de la vapeur. C'est le principe de la machine à double effet, machine qui fut portée par l'inventeur à une admirable perfection et qui est devenue de nos jours la machine motrice à peu près universelle. Ajoutons que depuis Watt il n'a été apporté, sauf la détente dont nous parlerons plus loin, que des améliorations de détail et qui ne touchent en rien aux principes essentiels de la construction. Nous allons décrire la machine de Watt, et il sera très-facile ensuite de se rendre compte des diverses modifications qu'on lui a fait subir.

365. Principe de la machine à double effet. — Soit une chaudière à vapeur M (fig. 317), communiquant, par les robinets *a* et *b*, avec la partie supérieure et inférieure du corps de pompe; deux autres robinets *c* et *d* établissent la communication de ce dernier avec le condenseur I. Si l'on ouvre les robinets *a* et *c*, *b* et *d* étant fermés, la vapeur arrivera au-dessus du piston P, tandis que celle qui avait été auparavant introduite au-dessous, étant en communication avec le condenseur, se condensera plus ou moins complétement, en perdant sa force élastique; le piston descendra donc jusqu'à la partie inférieure du corps de pompe. On ouvre alors les deux robinets *b* et *d*, tandis que les deux autres sont fermés; la vapeur se condensant à la partie supérieure du corps de pompe et agissant au-dessous du piston déterminera le mouvement ascendant de celui-ci, après quoi on pourra le faire redescendre de nouveau, et ainsi de suite.

On voit donc que par la manœuvre convenable des robinets *a*, *b*, *c*, *d*, on donnera au piston un mouvement de va-et-vient qui peut être facilement transformé en un mouvement de rotation. A cet effet, la tige du piston est liée à l'une des extrémités du balan-

cier EG par l'intermédiaire du parallélogramme articulé CBDE. L'autre extrémité du balancier est articulée à la bielle GL, qui s'articule elle-même avec la manivelle du volant RR.

On voit que si le piston se meut de haut en bas, l'action de la

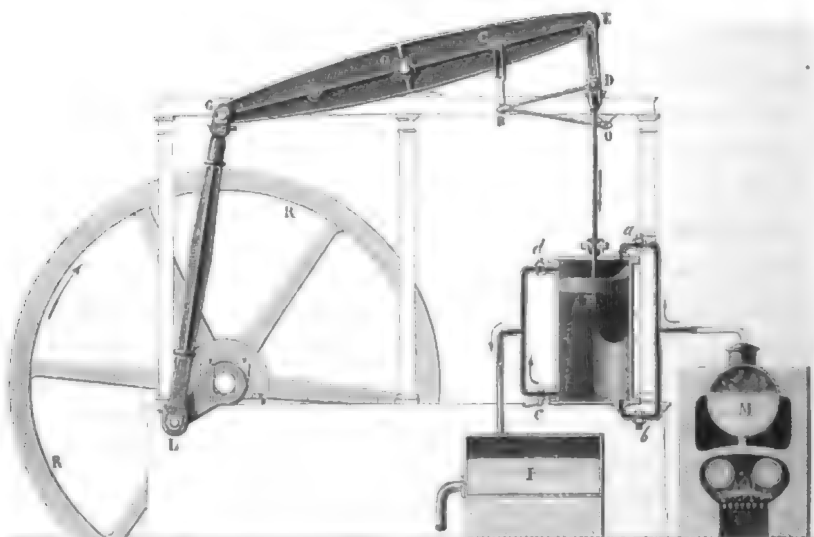


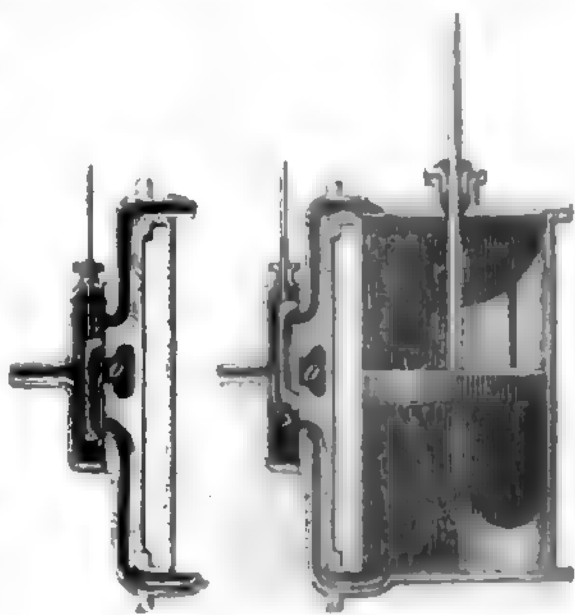
Fig. 317. — Principe de la machine à double effet.

bielle poussera le volant dans le sens indiqué par la flèche. Quand le piston sera arrivé au bas de sa course, la manivelle et la bielle se trouveront dans la même direction, et par suite ne pourront avoir d'action l'un sur l'autre : c'est ce que l'on appelle un *point mort*. Mais, en vertu de la vitesse acquise, le volant dépassera cette position et alors, le piston ayant commencé son mouvement ascendant, la rotation se continuera dans le même sens jusqu'au deuxième point mort, situé à 180 degrés du premier et qui sera dépassé de la même manière. On voit donc qu'à l'aide du mouvement alternatif du piston, on obtient un mouvement de rotation qui, se transmettant à un arbre de couche, peut être utilisé ensuite pour effectuer des travaux d'une nature quelconque.

Le parallélogramme articulé qui relie la tige du piston au balancier est l'une des inventions les plus ingénieuses de Watt; son but est facile à comprendre. Dans le mouvement de la machine.

l'extrémité E du balancier décrit un arc de cercle, tandis que l'extrémité D de la tige du piston décrit une ligne droite; il est donc impossible de lier directement ces deux points l'un à l'autre. Le point E est lié au point D par l'intermédiaire de la petite bielle ED; les deux autres bielles BD et BC forment avec la partie ED du balancier un parallélogramme *articulé*, c'est-à-dire que les angles, aux quatre sommets, peuvent varier suivant les positions du balancier. D'autre part, le sommet B est articulé à l'extrémité du levier BO mobile autour du point fixe O. L'effet de cette disposition est le suivant. Si, à partir de la position horizontale du balancier, celui-ci vient à s'élever, le point E sera tiré vers la gauche par le balancier et vers la droite par l'action de la bielle BO, qu'à raison de cette circonstance on appelle quelquefois le *contre-balancier*. On conçoit, par conséquent, que ces deux actions opposées puissent se compenser à peu près exactement, et que, par suite, l'extremité D suive naturellement et sans effort latéral une direction rectiligne.

366. Distribution de la vapeur. — Nous avons supposé, pour faire comprendre le mouvement de la machine, qu'on ouvrait et fermait alternativement les robinets *a, b, c, d*; en réalité il n'en est pas ainsi, c'est d'une manière automatique et par le jeu de l'appareil que la vapeur est alternativement admise au-dessus et au-dessous du piston et qu'elle se rend au condenseur. On se sert à cet effet d'une pièce appelée *tiroir*, dont la disposition varie d'ailleurs beaucoup; nous décrirons seulement ici le *tiroir à coquille*, qui est un des plus simples et des plus employés.


Fig. 318. — Tiroir.

La vapeur, au lieu de se rendre directement au corps de pompe, se rend dans une boîte qui le précède (fig. 318) et que l'on appelle la *boîte de distribution*. Sur la face de la boîte opposée à celle qui reçoit le tube sont trois ouvertures juxtaposées. L'ouverture supérieure communique avec la partie supérieure du corps de pompe; l'ouverture inférieure avec la partie inférieure, et l'ouverture intermédiaire avec *o* qui com-

munique lui-même avec le condenseur. Sur ces ouvertures se meut une pièce qui a la forme d'un prisme rectangulaire creusé d'un côté, à bords parfaitement dressés et dont les dimensions lui permettent de couvrir deux des ouvertures à la fois.

Dans la figure de droite, le tiroir est supposé à la partie supérieure de sa course; la vapeur arrive au-dessous du piston et pousse celui-ci dans le sens de la flèche; quant à la vapeur qui est au-dessus, elle est en communication, par l'intermédiaire du tiroir, avec le condenseur. Dans la seconde figure, c'est le contraire qui se produit, la vapeur arrive au-dessus du piston et celle qui est au-dessous est en communication, par le tiroir, avec le condenseur.

367. Mouvement du tiroir. — Il s'agit d'obtenir automatiquement ce mouvement alternatif du tiroir. A cet effet, sur l'arbre de la machine se trouve calée une pièce *e* (fig. 319) à profil circulaire,

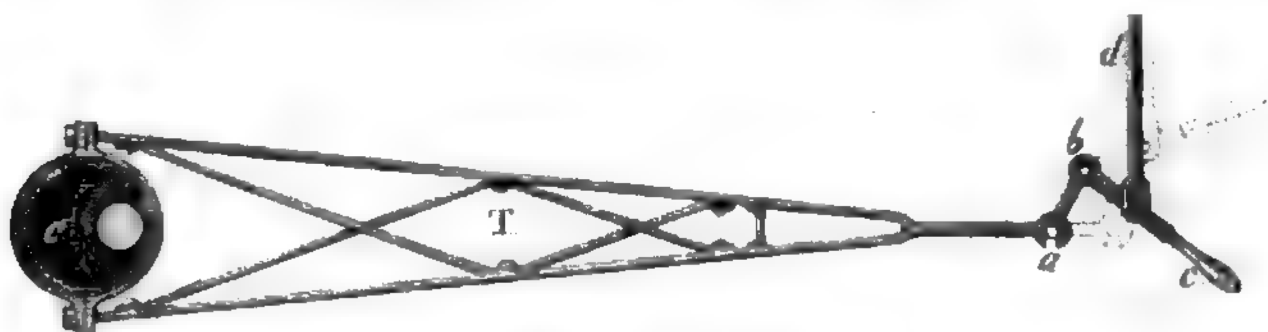


Fig. 319. — Manœuvre du tiroir.

mais qui est traversée par l'arbre en un point qui n'est pas son centre : de là le nom d'*excentrique circulaire* qu'on lui donne. Cet excentrique est entouré d'une bride en métal pouvant tourner librement sur son contour en faisant corps avec une sorte de grand triangle métallique T. Le sommet du triangle s'accroche au bout du levier coudé *abc*, qui reçoit ainsi un mouvement d'oscillation autour du point *b*. Par suite de ce mouvement, la tige *d* s'élève et s'abaisse successivement en conduisant le tiroir auquel elle est fixée.

368. Pompe d'épuisement du condenseur. — Le condenseur est un cylindre dans lequel on fait arriver un jet continu d'eau froide dont on règle la quantité suivant les cas. Or, à mesure que la vapeur se condense, elle échauffe l'eau froide, et en même temps l'air, que l'eau contient toujours en dissolution, se dégage à raison de la faible pression existant dans l'appareil ; il faut donc épuiser

l'eau et l'air du condenseur : c'est l'objet d'une pompe mise en mouvement par le balancier.

L'eau déjà chaude, extraite du condenseur, est portée dans un réservoir, d'où elle est puisée par une seconde pompe, mise aussi en mouvement par le balancier, et amenée dans la chaudière. Enfin, une troisième pompe, plus puissante en général que les deux précédentes, élève l'eau d'une source ou d'un puits et la fait parvenir dans une bâche, d'où elle passe dans le condenseur. Ces deux dernières pompes sont mises en mouvement par la portion du balancier située de l'autre côté de l'axe de rotation, par rapport à la pompe du condenseur.

369. Régulateur à force centrifuge. — Cet appareil, connu avant Watt, mais appliqué par lui à la machine à vapeur, est destiné à régler l'admission de la vapeur de telle façon que la vitesse demeure sensiblement constante malgré les variations que peut présenter la résistance à vaincre.

Il se compose d'un axe vertical y (fig. 320) qui reçoit de la machine un mouvement de rotation. Au sommet sont articulées deux tiges $\alpha\beta$, $\alpha'\beta'$ terminées par des masses pesantes Z et Z'. Deux autres tiges $\beta\varepsilon$, $\beta'\varepsilon'$, articulées sur les premières, forment avec celles-ci un losange dont la partie inférieure est fixée à un manchon m qui embrasse l'arbre de rotation. Lorsque l'appareil est au repos, les côtés du losange sont aussi rapprochés que possible de la verticale; mais lorsque l'appareil se met en mouvement, en vertu de la force centrifuge les boules s'écartent d'autant plus que la vitesse de rotation est plus rapide. En même temps le manchon inférieur se soulève et, par un système convenable de leviers, agit sur une clef placée dans le tube d'arrivée de la vapeur de manière à réduire l'admission à mesure que la vitesse devient plus considérable.

370. Utilité du volant. — D'après la manière dont le mouvement du piston se transmet à l'arbre de la machine, il est aisé de voir que la force motrice effective éprouve des variations considérables. Ainsi, par exemple, dans l'action de la bielle sur la manivelle, l'effet est maximum quand ces deux organes sont perpendiculaires, il est à peu près nul aux points morts. A ces variations de la

force doivent correspondre nécessairement des variations de vitesse. D'autres causes contribuent d'ailleurs à produire le même résultat, notamment les inégalités de la résistance à vaincre. Ainsi, par exemple, s'il s'agit d'une roue à cames soulevant un pilon, au moment où le pilon retombe la résistance principale est supprimée et la force motrice doit tendre à produire une accélération dans toutes les parties de la machine. Au moment où le pilon est de nouveau soulevé, la vitesse doit diminuer tout à coup, et ainsi de suite. Sans avoir un caractère aussi marqué, des phénomènes analogues se produisent dans toutes les machines. Or ces variations brusques de vitesse ont de graves inconvénients; elles agissent à la manière de chocs répétés, qui finissent par altérer la solidité des organes de l'appareil.

Le volant est destiné à prévenir ces effets destructeurs. C'est une grande roue massive d'un poids toujours relativement considérable, et à laquelle la machine imprime un mouvement de rotation. Si la force motrice vient à s'accroître, tous les points tendent à prendre des vitesses plus considérables, mais il est bien évident que l'accroissement de masse qu'occasionne le volant diminue la variation particulière de chacun d'eux. Inversement, si la résistance devient un instant prépondérante, la vitesse diminue partout, et à ce décroissement correspond un travail effectué, et il est encore évident que plus le nombre des points qui cèdent ainsi leur vitesse est considérable, plus la variation de la vitesse commune est petite. On peut donc considérer le volant comme une sorte de réservoir de vitesse, ou, ce qui est la même chose, de travail, où celui-ci s'emmagasine lorsque la force motrice est plus grande que celle que nécessite la résistance à vaincre. Lorsqu'au contraire la force motrice est insuffisante, c'est le volant qui fournit la quantité nécessaire pour surmonter la résistance. Dans tous les cas, si les dimensions du volant sont assez considérables, les variations de vitesse correspondantes aux inégalités de force motrice et de résistance seront peu de chose par rapport à la vitesse moyenne, et il en résultera pour le mouvement général une suffisante régularité. On détermine ordinairement les dimensions du volant de façon que les plus grandes variations de vitesse ne dépassent pas 1/15 de la vitesse moyenne.

371. Description générale de la machine de Watt. — Les explications qui précèdent permettront au lecteur de comprendre la disposition générale de la machine de Watt, représentée dans la

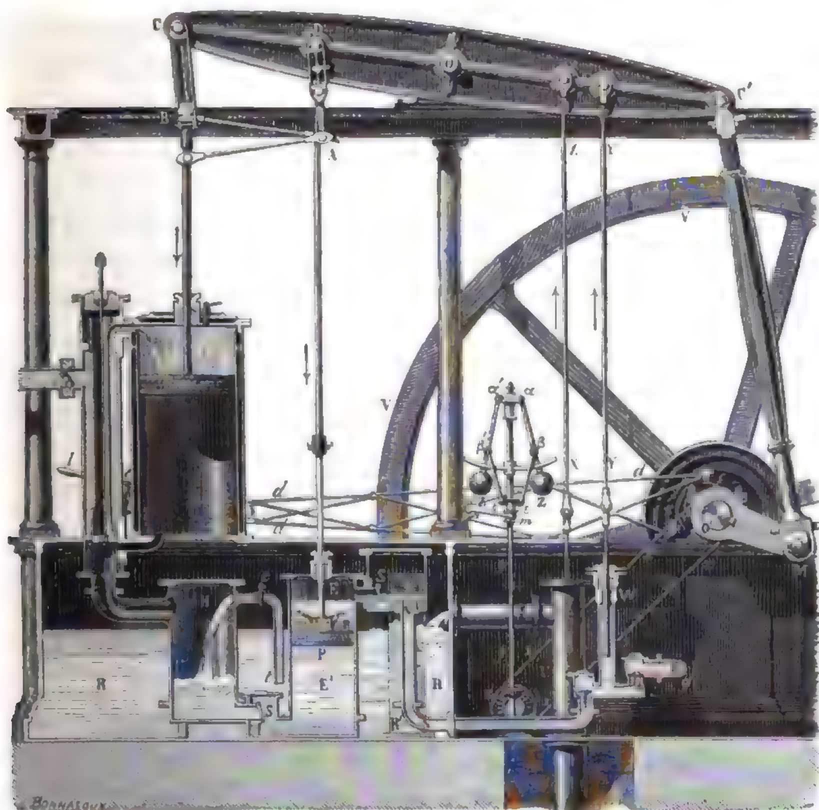


Fig. 320. — Machine de Watt.

ABCD, parallélogramme articulé. — CC', balancier mobile autour du point O. — C'M, bielle de transmission. — O'M, manivelle fixée à l'axe du volant. — VV, volant. — *c*, excentrique circulaire qui, par l'intervention du triangle *dd*, met en mouvement le levier *el* qui mène le tiroir. — *xx*, corde sans fin qui passe sur une poulie fixée sur l'axe O' et sur une seconde *z*, dont le mouvement se transmet par une roue d'angle à l'axe *y* du modérateur à force centrifuge. — *am*, tige menée par le manchon *m* et dont le mouvement se transmet à l'aide de leviers au registre d'admission. — H, condenseur. — RR, bâche contenant de l'eau froide qui entoure le condenseur. — *t*, tuyau par lequel l'eau de la bâche R pressée par l'atmosphère s'écoule dans le condenseur. — EE', cylindre de la pompe d'épuisement du condenseur. — P, piston. — S, soupape. — X, tige de la pompe U, qui alimente la bâche RR. — R', bâche dans laquelle se déverse l'eau extraite du condenseur. — S', soupape. — Y, tige de la pompe alimentaire W, qui puise l'eau en R' et la refoule dans la chaudière.

figure 320. Il nous suffira d'en donner ici la légende, en faisant remarquer toutefois que le tiroir présente une disposition un peu différente de celle que nous avons décrite, mais il n'y a aucun intérêt à en faire connaître la disposition détaillée.

372. Détente de la vapeur. — Parmi les modifications qui ont été introduites dans la machine de Watt, il faut signaler en première ligne la détente.

Lorsque le piston a parcouru une fraction de sa course, on supprime l'introduction de la vapeur dans le corps de pompe; alors le piston est poussé par la vapeur primitivement introduite qui se détend, c'est-à-dire dont la force élastique va en diminuant. On économise évidemment, par ce moyen, une certaine quantité de vapeur; on a en outre l'avantage d'éviter les chocs qui se produisent à la fin de la course du piston, et qui détériorent à la longue la machine, outre qu'ils épuisent toujours une partie de la force motrice.

On fait commencer la détente à une époque variable, tantôt à la moitié, tantôt au quart ou au cinquième de la course du piston. Il est aisé de concevoir que plus tôt la détente s'opère, plus il y a économie, puisque pendant toute la période de la détente le travail se fait sans consommation de vapeur; mais, d'un autre côté, la force élastique de la vapeur diminuant à mesure qu'elle se détend, il faut qu'il reste toujours une force suffisante pour vaincre les résistances, et pour que la vitesse de divers mécanismes que la machine met en jeu n'éprouve pas de trop grandes variations.

373. Excentriques à détente. — Pour que la détente de la vapeur puisse s'opérer, il faut nécessairement modifier le mouvement du tiroir, de façon que, la condensation s'opérant toujours d'un côté du piston, la vapeur cesse d'arriver de l'autre; il doit donc y avoir des temps d'arrêt dans le mouvement. On arrive à produire ces modifications en faisant conduire la tige qui dirige le tiroir par un excentrique à courbe discontinue. Pour que le tiroir reste en repos à un moment déterminé, il suffit que la portion de la courbe correspondante soit un arc de cercle concentrique à l'axe de rotation.

Comme l'excentrique circulaire est d'une installation plus

facile, on se sert fréquemment de lui pour produire la détente. A cet effet, M. Clapeyron a imaginé de fixer sur les bords *bc, b' c'* du tiroir deux plaques *ad, a' d'*, dont la largeur dépasse de beaucoup celle des ouvertures d'admission L, L' (fig. 321). Cet excédant de largeur s'appelle *recouvrement*. De cette façon l'une des ouvertures peut rester fermée pendant un temps plus ou moins long, la vapeur cesse alors d'être admise et n'agit plus que par sa détente. La détente est d'autant plus grande que le recouvrement est plus considérable, sans pourtant lui être proportionnelle, à cause des variations de vitesse du piston et du tiroir. On peut d'ailleurs rendre la détente variable à l'aide de la coulisse de Stephenson, qui sera décrite plus loin à propos des locomotives.

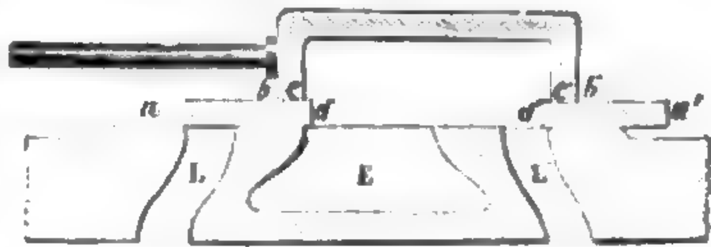


Fig. 321. — Tiroir à détente.

374. Machine de Woolf. — La détente s'opère assez fréquemment dans un cylindre distinct de celui où arrive d'abord la vapeur; on a ainsi ce que l'on appelle les machines à deux cylindres ou machines de Woolf. La vapeur, en sortant du cylindre ABCD, passe dans le cylindre A'B'C'D' de section plus grande, et c'est dans ce cylindre que s'effectue la détente. Les deux pistons *p* et P liés au balancier montent et descendent ensemble, voici de quelle façon :

Supposons-les tous les deux en haut de leur course; la vapeur arrive par A et abaisse le piston *p* en chassant la vapeur qui est au-dessous par l'ouverture D; elle se répand donc dans le grand cylindre, s'y détend et pousse le piston P dans le même sens que *p*; comme sa force élastique va naturellement en décroissant, on donne pour favoriser l'effet une plus grande section au piston P. Quant à la vapeur qui est au-dessous de ce dernier, elle s'échappe, soit dans le condenseur, soit dans l'air par D'. Les deux pistons descendent donc ensemble. Pendant cette période; l'ouverture D est restée fermée; on l'ouvre au moment où les deux

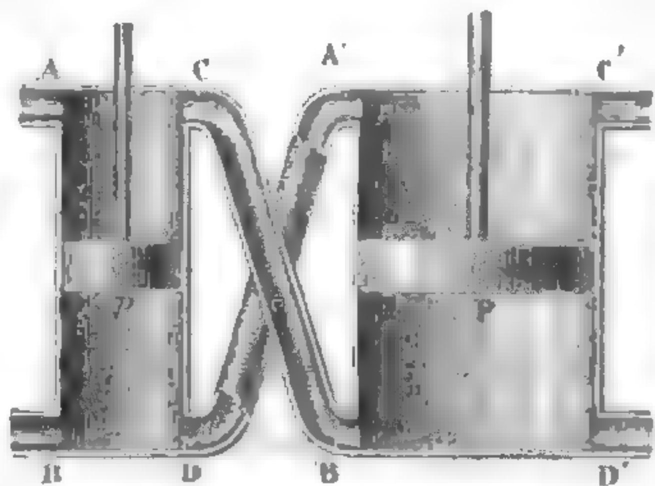


Fig. 322. — Machine de Woolf.

pistons atteignent le bas de leur course, et on ferme C. La vapeur arrive alors au-dessous du piston, et celle qui est au-dessus se rend au-dessous de P, tandis que la partie supérieure de celui-ci est en communication par C′ avec le condenseur ou l'air; les deux pistons remontent donc ensemble, et ainsi de suite. La distribution de la vapeur, que nous venons de décrire, se fait d'ailleurs à l'aide de deux tiroirs menés chacun par un excentrique convenable.

Pendant longtemps on a cru que la détente s'opérait avec plus de profit dans les machines de Woolf; mais depuis quelques années on obtient d'aussi bons résultats avec les machines à un cylindre, qui occupent moins de place et dont l'installation est plus simple.

375. Différents systèmes de machines fixes. — Les explications précédentes permettent de comprendre les différents systèmes de machines à vapeur. Ces appareils peuvent être classés soit d'après la force élastique de la vapeur, soit d'après son mode d'action, soit d'après la disposition du mécanisme et la manière dont se transmet le mouvement du piston. Au point de vue de la force élastique de la vapeur, les machines peuvent être divisées en trois catégories :

1° Machines à basse pression, dans lesquelles la force élastique ne s'élève pas au-dessus d'une atmosphère et demie;

2° Machines à moyenne pression; force élastique de 1 1/2 à 4 atmosphères;

3° Machines à haute pression; force élastique de 4 atmosphères et au-dessus.

Dans les machines à basse pression, la faible tension de la vapeur met à l'abri des chances d'explosion; d'autre part, les organes, éprouvant une fatigue moindre, sont moins sujets à l'usure et aux avaries. Mais ces avantages sont compensés par des inconvénients graves. La pression étant faible, on doit donner au piston une plus grande surface pour obtenir une force donnée. A cette plus grande dimension correspond une dimension plus grande de tous les organes, de sorte que la machine devient lourde et encombrante. Elle présente en outre une surface rayonnante considé-

rable, par laquelle se perd une grande quantité de chaleur. D'autre part, la détente ne peut être employée dans ces machines que d'une façon très-restreinte, et enfin la nécessité de la condensation exige l'emploi d'une grande masse d'eau.

Ces inconvénients ne se rencontrent pas dans les machines à haute et moyenne pression. Leur volume est plus restreint, elles permettent d'utiliser la détente et de supprimer la condensation en laissant échapper la vapeur dans l'air. Mais, d'autre part, l'usure des pièces est beaucoup plus rapide et les avaries sont plus fréquentes ; aussi les hautes pressions ne sont pas admises pour les machines de navigation, dans lesquelles les chances d'avarie sont augmentées par l'action de l'humidité, de l'eau salée, des courants galvaniques, du roulis, etc. ; c'est une des causes du volume vraiment formidable que présentent les puissantes machines de ce genre. Mais dans les machines fixes et les locomotives les hautes pressions sont à peu près exclusivement employées ; toutefois on ne dépasse pas en général la limite de 6 atmosphères.

Au point de vue du mode d'action de la vapeur, la machine peut être à condensation ou sans condensation, avec ou sans détente. Théoriquement parlant, la condensation est essentiellement avantageuse, car elle augmente la chute de chaleur à laquelle, d'après la théorie mécanique (363), est proportionnelle la quantité de travail produit. De plus, la chaleur dégagée dans la condensation se retrouve dans l'eau que l'on emploie généralement pour l'alimentation de la chaudière, ce qui est évidemment un avantage. Mais dans la pratique, la nécessité de se procurer l'eau destinée à alimenter le condenseur annule à peu près les avantages inhérents à ce mode d'action, et en fait, les machines à condensation sont peu répandues.

Quant à la détente, elle est évidemment avantageuse, et un simple raisonnement suffit pour le faire comprendre. Supposons que la détente s'opère à la moitié de la course, on ne dépense que la moitié de la vapeur qui serait nécessaire dans le cas de la pleine pression, et, par suite, que la moitié du combustible. Mais puisque le piston atteint néanmoins le bas de sa course, le travail produit est plus grand que celui que produirait la pleine pression seule. Le travail produit diminue donc dans un moindre rapport que la

dépense, et c'est en cela que consiste l'avantage de la détente. Cet avantage est d'ailleurs d'autant plus grand que la détente commence plus tôt, comme le montre le tableau suivant. Le travail à pleine pression est pris pour unité.

Fraction de la course où commence la détente.	Travail produit.	Fraction de la course où commence la détente.	Travail produit.
1,0.	1,000	0,5.	1,693
0,9.	1,105	0,4.	1,916
0,8.	1,223	0,3.	2,204
0,7.	1,357	0,2.	2,609
0,6.	1,509	0,1.	3,302

Une nouvelle classe de machines doit son origine à la théorie mécanique de la chaleur, ce sont les machines à vapeur surchauffée. Nous savons que le travail produit est proportionnel à la chute de chaleur; une très-grande chute est possible avec l'air, mais l'usure est énorme. Avec de la vapeur à saturation, la chute ne peut être que médiocre, à cause de la rapidité avec laquelle s'accroît la force élastique quand la température augmente. Mais si, après avoir produit de la vapeur dans cet état, on la fait passer dans un réservoir à haute température, on aura une sorte de gaz, mais beaucoup moins capable de détériorer les organes que l'air atmosphérique. Il semble donc que les machines de ce genre soient appelées à un véritable avenir; déjà des essais très-nombreux ont été faits et ont donné des résultats qui, sans être encore très-précis, peuvent être considérés certainement comme ne démentant pas les prévisions de la théorie.

376. Nature et disposition des organes mécaniques. — Au point de vue du mécanisme, les machines à vapeur présentent des dispositions assez variées. Dans les machines à basse pression on a conservé assez généralement le parallélogramme articulé et le balancier; mais dans les machines à haute et moyenne pression la disposition est ordinairement plus simple. La tige du piston, guidée par une glissière, est simplement articulée à une bielle, articulée elle-même à la manivelle du volant. Le cylindre peut être d'ailleurs ou vertical ou horizontal, quelquefois même incliné. La figure 323 représente une machine de ce genre à cylindre vertical

à détente et sans condensation ; la légende suffira pour en faire comprendre la disposition.

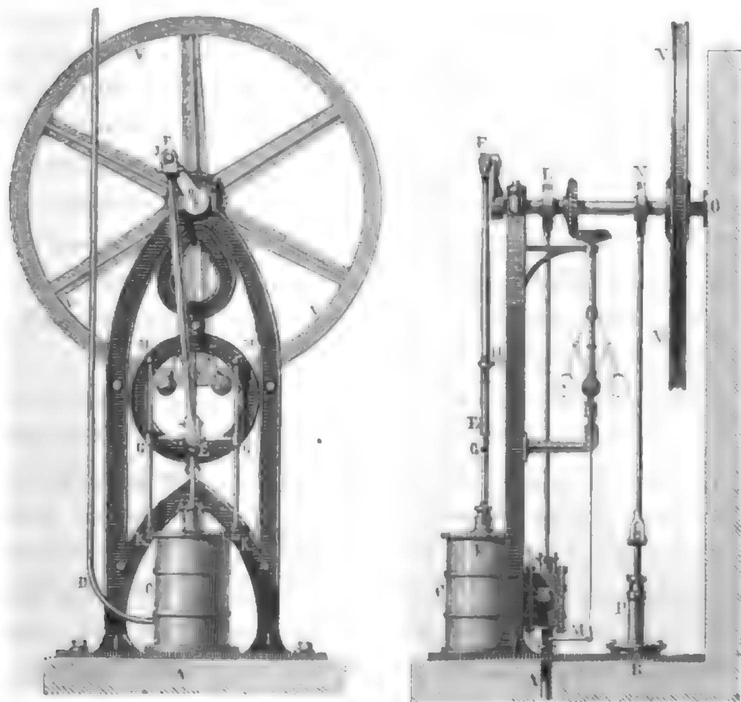


Fig. 323. — Machine à cylindre vertical à haute pression, à détente et sans condensation.

A, tuyau d'arrivée de la vapeur. — Z, boîte de distribution. — B, tiroir à recouvrements. — C, corps de pompe. — GG, glissière fixée d'un côté sur le corps de pompe en K et de l'autre au bâti en H. — EF, bielle de transmission. — J, manivelle. — VV, volant. — L, excentrique du tiroir. — N, excentrique de la pompe alimentaire P. — D, tuyau d'échappement de la vapeur. — M, clef d'admission de la vapeur sur laquelle agit le régulateur à force centrifuge.

On peut diminuer la place occupée par les machines en articulant directement la tige du piston avec la manivelle, et supprimant la bielle. Dans ce cas, le cylindre est rendu oscillant autour de deux tourillons creux dont l'un sert à l'admission de la vapeur, et l'autre à sa sortie. La distribu-

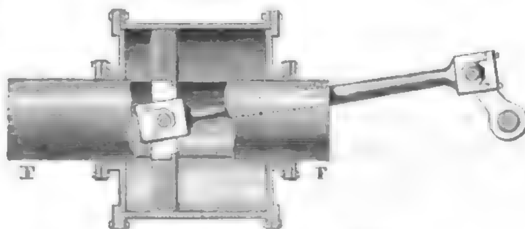


Fig. 324. — Machine à fourreau.

tion de la vapeur se fait à l'aide d'un tiroir dont le mouvement est emprunté à celui du cylindre. Les machines à cylindre oscillant sont peu usitées aujourd'hui; on peut, en effet, obtenir le même résultat avec un cylindre fixe, ce qui est toujours plus commode. A cet effet on supprime la tige du piston et on la remplace par un tube creux appelé *fourreau* (fig. 324), qui traverse la base supérieure et quelquefois les deux bases du corps de pompe. La bielle est directement articulée au piston, et son mouvement d'oscillation se produit dans l'intérieur du fourreau. Il est évident que, dans cette disposition, le corps de pompe doit, toutes choses égales d'ailleurs, avoir une plus grande section, puisque la partie correspondante au fourreau est perdue.

377. Machines à rotation directe. — La transformation du mouvement alternatif du piston en un mouvement circulaire continu est naturellement accompagnée d'une certaine perte de travail; c'est à cause de cela qu'on a souvent essayé d'appliquer directement la vapeur à faire mouvoir un arbre de couche. Les essais de ce genre ont, en général, médiocrement réussi; et jusqu'à présent aucune machine rotative n'a réussi à se faire une place réelle dans la pratique. Dans les différentes combinaisons qu'on a imaginées, on ne s'est pas beaucoup écarté de la disposition proposée par Watt, en 1782. Le piston est formé par une sorte de came tournant autour de l'axe d'une cavité cylindrique, de façon à diviser celle-ci en deux compartiments; l'un est en communication avec la vapeur et l'autre avec l'air ou le condenseur. Au moment où s'achève cette excursion, et en vertu de sa vitesse acquise, la came dérange momentanément une cloison qui forme une des parois du tuyau d'admission. Par l'action d'un ressort, la cloison reprend sa position initiale après le passage de la came, et le mouvement se continue dans le même sens. De très-grandes difficultés se rencontrent dans ce système pour empêcher les fuites de vapeur et les chocs; la machine de Behren, que nous décrivons ici, est une des plus simples et des mieux conçues.

La figure 325 est une vue perspective de l'appareil, et la figure 326 une coupe perpendiculaire à l'axe du tambour qui montre le mode d'action de la vapeur. C et C' sont deux axes parallèles réunis à l'ex-

térieur par deux roues d'engrenage, de sorte que le mouvement de l'un détermine celui de l'autre; l'un d'eux constitue l'arbre moteur. Ces deux axes sont entourés de colliers c et c' faisant corps avec les secteurs cylindriques E et E'; ces derniers peuvent se mou-



Fig. 325. — Machine de Behren.

voir dans les cylindres incomplets A, A et jouent le rôle de pistons. Dans la position indiquée par la figure, la vapeur est admise en B et s'échappe en D; elle agit seulement sur le secteur E et le pousse dans le sens de la flèche; l'arbre C tourne donc et détermine à l'aide de l'engrenage extérieur le mouvement contraire de C' et

par suite de E'. Au bout d'une demi-révolution, le secteur E' aura dans le cylindre de gauche une position équivalente à celle qu'a actuellement le secteur E dans le cylindre de droite ; il sera donc poussé par la vapeur, de manière que le mouvement se continue dans le même sens pendant une demi-révolution, au bout de laquelle les organes seront revenus à leur position initiale. La simplicité de ce mécanisme, d'invention récente, est extrême, et quelques essais, qui ont besoin d'être complétés, paraissent prouver qu'il a une véritable valeur industrielle.

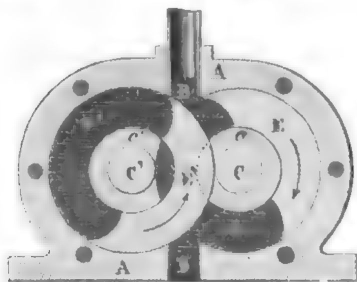


Fig. 326. — Coupe de la machine de Behren.

378. Locomobiles. — On désigne sous le nom de *locomobiles* des machines ordinairement à cylindre horizontal qui sont portées sur des roues de manière à pouvoir être transportées dans les lieux où l'on a besoin de force motrice. Ces machines se rapprochent des locomotives au premier aspect, ce qui tient à ce qu'elles sont, comme ces dernières, à foyer intérieur ou même à chaudière tubulaire, qu'elles fonctionnent sans condensation et qu'elles ont à l'avant une boîte à fumée surmontée d'une cheminée par laquelle s'échappent les produits de la combustion. A part ces circonstances, elles ne diffèrent pas essentiellement des machines fixes. L'emploi de ces utiles machines se généralise de plus en plus dans les travaux publics et privés et même dans les travaux agricoles.

379. Machines à vapeur outils. — Aux différents types de machines que nous venons d'énumérer il faut ajouter les locomotives, dont nous parlerons plus loin, et les machines de navigation, qui, à part leurs énormes dimensions et leur très-grande puissance, ne présentent pas de différence fondamentale avec les machines ordinaires. Il est bon de mentionner aussi les *outils à vapeur*, qui empruntent leur force motrice à une machine à vapeur spéciale faisant partie de leur agencement général, au lieu de la recevoir d'un arbre de couche par une courroie de transmission. L'usage

des outils à vapeur se répand de plus en plus, mais la nature de ce traité ne nous permet point d'entrer à cet égard dans aucun détail; nous nous bornerons à mentionner parmi ceux qui sont les plus connus : les *marteaux-pilons*, les *cisailles à vapeur*, les pompes d'alimentation appelées *petit cheval*, les *machines à percer, river et poinçonner*, les *sonnettes à vapeur* pour battre les pilots, etc.

380. Chaudières. — Les chaudières les plus en usage aujourd'hui dans les machines fixes sont les chaudières dites à bouilleurs. Elles sont formées d'un corps cylindrique A terminé par deux demi-sphères et communiquant avec deux tubes bouilleurs.

Les tubes bouilleurs B,B sont d'un diamètre beaucoup plus petit que la chaudière et ont la même longueur; ils communiquent

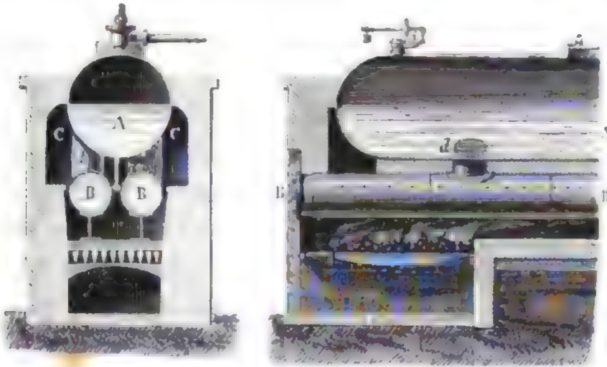


Fig. 327. — Chaudière à bouilleurs.

avec elle par le moyen des tuyaux *d, d,* que l'on appelle *puisards*, et qui sont, en général, au nombre de trois pour chaque bouilleur. L'intervalle compris entre les bouilleurs dans le sens de la longueur est occupé par une cloison; il en est de même de celui qui existe entre les puisards d'un même tube : dispositions qui ont pour objet de multiplier le plus possible les points de contact des produits divers de la combustion avec la chaudière. En effet, la flamme circule d'abord au-dessous des bouilleurs, d'avant en arrière, puis revient entre les puisards, et enfin longe, dans l'espace CC, les portions latérales de la chaudière, pour s'échapper de là dans la cheminée.

On voit dans la chaudière A le niveau de l'eau; la capacité

relative de la portion occupée par la vapeur et par le liquide varie suivant les cas, mais toujours de façon que la vapeur arrive aussi *sèche* que possible dans le corps de pompe, c'est-à-dire n'entraîne pas avec elle de gouttelettes liquides. Avant de pouvoir être employées dans l'industrie, les chaudières doivent être essayées et soumises à une pression très-supérieure à celle qu'elles doivent supporter dans leur service. D'ailleurs l'épaisseur qu'on donne à leurs parois est elle-même l'objet d'une réglementation administrative.

381. Chaudières à foyer intérieur. — Lorsqu'on a besoin de diminuer le poids de la chaudière, tout en conservant une surface de chauffe considérable, ainsi que cela arrive dans les bateaux à vapeur, les locomobiles, on place le foyer dans le sein même de la chaudière, de façon qu'il soit entouré d'eau de tous côtés. Pour la navigation on a adopté généralement des chaudières tubulaires analogues à celles des locomotives. La flamme et les produits de la combustion passent du foyer, situé à la partie antérieure de la chaudière, dans deux larges conduits qui les mènent à la partie postérieure, dans une cavité entourée d'eau de toutes parts; là ils se réfléchissent et reviennent par une série de tubes qui traversent la chaudière de part en part au-dessus du foyer où se trouve la cheminée par laquelle ils s'échappent.

382. Explosion des chaudières. — Appareils de sûreté. — Malgré les essais auxquels les chaudières sont soumises avant d'entrer en service, il arrive encore trop souvent que sous l'action d'une pression trop forte, ou par suite d'une altération survenue dans leur constitution interne, elles font explosion en occasionnant toujours de grands désastres. Ces explosions peuvent provenir d'une surchauffe progressive de l'eau, par suite de la négligence du chauffeur. La vapeur atteint ainsi successivement une force élastique supérieure à celle qui correspond à la résistance des parois, et alors celles-ci se brisent. Cette surchauffe a lieu fort rarement, car la pression est continuellement indiquée par des instruments de diverses sortes; et d'ailleurs eût-elle lieu, les explosions seraient, en général, prévenues par les appareils de sûreté. Nous allons indiquer les divers instruments qu'on emploie soit pour indiquer

la pression de la vapeur, soit pour lui donner issue lorsque sa pression pourrait devenir trop forte.

1° *Thermomanomètre.* —La pression de la vapeur d'eau étant liée à la température à laquelle elle se produit, il suffit d'observer cette dernière. On emploie pour cela un thermomètre dont l'échelle s'étend jusqu'à 200°. Afin d'empêcher le réservoir d'être déformé ou corrodé par l'eau et la vapeur, on le renferme dans un tube en fer fermé par le bas et fixé supérieurement à une ouverture de la chaudière. L'espace que laisse le thermomètre autour de lui est rempli par de la limaille de cuivre. Sur l'échelle de l'instrument on place, à côté de la température, la pression correspondante de la vapeur; de là le nom de *thermomanomètre.*

2° *Manomètre.* — Les manomètres donnent directement la pression de la vapeur. On se sert soit des manomètres à mercure, à air libre ou à air comprimé, soit du manomètre métallique de Bourdon. Ces instruments ont été décrits au chapitre XIV.

3° *Soupape de sûreté.* — La soupape de sûreté, représentée sur la figure 327 se compose d'une pièce métallique ayant la forme d'un cône tronqué ou d'un simple plan, fermant exactement une ouverture placée sur une tubulure de la chaudière. A la partie supérieure se trouve une pointe sur laquelle s'appuie un levier mobile et chargé d'un poids. La grandeur du poids et la longueur du levier sont calculées de telle façon que la pression exercée sur la soupape soit précisément celle que la vapeur ne doit pas dépasser. S'il y avait dès lors surchauffe au delà de cette limite, la soupape s'ouvrirait et donnerait issue à la vapeur.

Dans les machines mobiles, les soupapes, au lieu d'être pressées par un poids, le sont par un ressort dont on peut faire varier la tension à l'aide d'une clef à vis.

Les soupapes de sûreté peuvent prévenir les explosions qui seraient dues à une surchauffe graduelle de la chaudière, mais elles sont entièrement inefficaces dans d'autres circonstances. Il peut arriver, en effet, que tout à coup, et par des causes difficiles à apprécier d'une manière complète, il se produise une quantité considérable de vapeur; celle-ci, agissant brusquement sur les parois, en provoque infailliblement la rupture, et cela sans que la

soupape de sûreté s'ouvre, ou même que le manomètre ait le temps d'accuser une augmentation de pression. Plusieurs causes peuvent amener la production immédiate d'une quantité considérable de vapeur. Si, par exemple, le niveau de l'eau vient à baisser dans la chaudière d'une quantité trop forte, les parois nues peuvent être exposées à l'action directe du foyer et s'échauffer ainsi beaucoup au delà de la température que l'eau elle-même doit posséder; aussi, quand cette dernière arrive dans la chaudière et se trouve en contact avec le métal porté à une température si élevée, il y a une production brusque de vapeur qui peut déterminer l'explosion.

On voit, par conséquent, qu'il est très-important de veiller à ce que le niveau de l'eau ne descende pas au-dessous d'une certaine limite, qui dépend de la forme et de la capacité tant du fourneau que de la chaudière. Dans les chaudières à bouilleurs, l'eau doit s'élever d'une petite quantité au-dessus du centre du cylindre.

Pour atteindre un but aussi important, on emploie divers moyens :

1° Deux robinets sont placés, l'un dans la région que doit occuper la vapeur, l'autre dans celle qui correspond à l'eau, mais à une petite distance l'un de l'autre; si on vient à les ouvrir à un moment quelconque, de la vapeur doit s'échapper par le premier et de l'eau par le second.

2° L'*indicateur de niveau* est un tube en cristal qui s'ajuste à ses extrémités dans deux tubulures correspondant l'une avec la partie supérieure, l'autre avec la partie inférieure de la chaudière; il est clair, d'après cela, que le niveau de l'eau dans la chaudière et dans le tube devra être le même, et par conséquent sera constamment, pour ainsi dire, sous les yeux du chauffeur. Il se produit toutefois dans cet instrument des oscillations assez marquées, surtout dans les machines mobiles, qui nuisent à l'exactitude de ses indications. Quelquefois aussi le tube en cristal se brise ; dans ce cas, le chauffeur supprime la communication des deux tubulures avec la chaudière, opération qu'il peut faire promptement à l'aide d'une transmission de mouvement très-simple, et substitue un tube de rechange à celui qui s'est brisé.

383. Indicateur magnétique. — Indépendamment de ces deux

moyens, dont l'emploi est réglementaire, on a imaginé divers appareils; l'un des plus sûrs, des plus simples et des plus employés dans les usines, est l'indicateur magnétique. Il est formé d'un flotteur dont la tige sortant de la chaudière porte un aimant en fer à cheval qui peut se mouver dans l'intérieur d'une boîte en cuivre. Sur la paroi extérieure de celle-ci se trouve une petite aiguille d'acier qui suit tous les mouvements de l'aimant, et fait ainsi connaître à chaque instant le niveau du liquide. Quand celui-ci descend au-dessous d'une certaine limite, la partie recourbée de l'aimant agit sur un levier qui détermine l'ouverture d'une soupape placée à la partie supérieure de la boîte. La vapeur s'échappe et passe à travers un sifflet qui donne l'alarme.

384. La vaporisation subite de l'eau peut aussi être déterminée par les incrustations qui se produisent toujours sur les parois de la chaudière à raison de l'impureté de l'eau dont on se sert. Ces incrustations conduisent mal la chaleur, les parois qu'elles recouvrent peuvent s'échauffer beaucoup, et lorsque ensuite l'eau vient à les toucher, il en résulte une vaporisation subite.

On prévient les incrustations en alimentant la chaudière avec de l'eau distillée quand cela est possible, ou bien en jetant dans l'eau de la fécule de pomme de terre ou de l'argile fine qui délaye les matières salines et les empêche de s'agréger.

Sur mer, où l'eau renferme une si forte proportion de substances salines, on a en général deux chaudières jumelles qu'on fait fonctionner et qu'on nettoie alternativement.

Nous signalerons encore, parmi les causes d'explosion, le diamètre insuffisant des *puisards* dans les chaudières à bouilleurs. Dans ce cas, la vapeur qui se forme peut n'être pas immédiatement remplacée par de l'eau, et les bouilleurs en contact avec le feu se surchauffent.

Enfin une cause physique, dont l'influence n'a été reconnue que récemment, peut aussi jouer un grand rôle. On a constaté que, lorsque l'eau est privée d'air, elle bout plus difficilement, et à une température suffisamment élevée se réduit brusquement en vapeur avec une véritable explosion (263. Expérience de Donny). Quelque chose d'analogue doit se produire lorsque la machine à vapeur

cesse de fonctionner pendant quelque temps; l'eau de la chaudière non renouvelée doit être privée d'air; la vaporisation se fait lentement, et si l'on vient à activer le feu, l'explosion peut avoir lieu. Il convient donc d'après cela, même quand la machine est arrêtée, de faire fonctionner la pompe alimentaire afin de mêler constamment un peu d'air à l'eau de la chaudière.

385. Alimentation des chaudières. — Injecteur Giffard. — L'alimentation des chaudières se fait ordinairement avec des pompes que la machine elle-même met en mouvement. Depuis quelques années, on se sert fréquemment d'un appareil extrêmement simple, dû à M. Giffard, et qui permet l'alimentation directe, ce qui donne lieu à une notable économie de force motrice.

Cet appareil fort curieux se compose d'un tube *tt* de forme conique, par lequel sort la vapeur pendant la marche de l'injec-

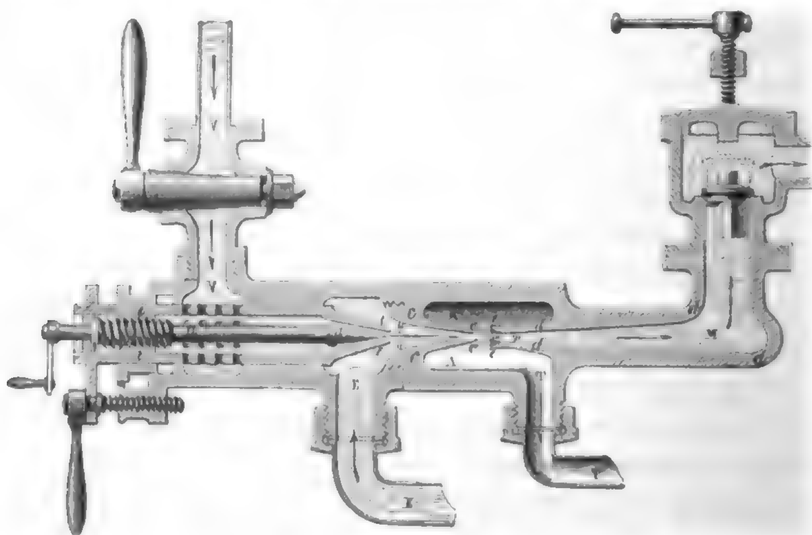


Fig. 328. — Injecteur Giffard.

teur; la vapeur arrive de la chaudière par le tube VV et pénètre dans le tube *tt* par de petits trous percés sur le pourtour de ce dernier. La vapeur, à la sortie du cône E, entre dans un autre cône *cc*, où elle rencontre l'eau qui doit alimenter la chaudière à vapeur et qui arrive par le tube EE. Du contact de la vapeur avec l'eau résultent deux effets : 1° comme la vapeur est animée d'une

grande vitesse due à la pression de la chaudière, elle communique une portion de sa vitesse à l'eau ; 2° en même temps qu'a lieu cet échange de vitesse, la vapeur se condense, puisqu'elle est en contact avec de l'eau à une température bien inférieure à la sienne, de sorte qu'à l'extrémité du cône jusqu'en *ee*, il ne reste plus qu'un fluide composé presque entièrement d'eau ; quelques bulles de vapeur restent seules au centre de la veine liquide.

La veine fluide, à sa sortie du cône *cc*, parcourt à l'air libre une petite distance avant d'entrer dans un cône divergent *dd* opposé, qui doit la conduire à la chaudière au moyen du tuyau M. Pour que cette veine entre dans la chaudière, il suffit que sa vitesse soit assez grande pour engendrer, dans le cône divergent, une pression supérieure à celle de la chaudière ; dans ce cas, une soupape qui sert, lorsque l'injecteur ne fonctionne pas, à empêcher l'eau de sortir de la chaudière, se soulève et permet l'alimentation du générateur.

Pour compléter cette courte description, il reste à indiquer quelques mécanismes qui servent à la réglementation de l'appareil. Il est utile, suivant la pression de la chaudière, de pouvoir faire varier le volume de vapeur débité par le cône *tt* ; cela s'obtient facilement avec la tige filetée *aa*, qui se meut au moyen d'une manivelle et qui porte le nom d'*aiguille*. Il est aussi indispensable de faire varier le volume d'eau qui afflue dans le cône *cc* par l'appel produit par la vapeur qui sort du cône *tt* ; on y arrive en manœuvrant un levier qu'on ne voit pas sur la figure et qui fait marcher le tube et le cône *tt* qui le termine.

Enfin le tube E plonge dans le baquet qui contient l'eau pour l'alimentation ; il est destiné à conduire l'eau aspirée dans le cône *cc*. Le tube AT sert de trop-plein au moment de la mise en marche de l'appareil.

386. Locomotive. — Du vivant même de Watt on avait songé à se servir de la vapeur pour mettre en mouvement les voitures ; différents essais eurent lieu à ce sujet, et il existe encore au Conservatoire des arts et métiers une voiture à vapeur construite en 1778 par Cugnot. Dans la plupart des expériences faites depuis cette époque jusqu'à nos jours, on rencontrait des difficultés d'exécution telles, que la question de la construction de voitures à vapeur

capables de circuler sur les routes ordinaires paraissait abandonnée; ce n'est que récemment qu'on est arrivé à quelques résultats satisfaisants. Sur les voies ferrées, où la force de traction est beaucoup moindre que dans les routes ordinaires[1], les essais se poursuivirent avec persévérance, mais on éprouvait une difficulté qui paraissait insurmontable à produire la quantité de vapeur nécessaire à la marche.

En 1827, M. Marc Seguin eut la première idée des chaudières tubulaires; cette disposition augmentant beaucoup la surface de chauffe, il en résulte une vaporisation beaucoup plus intense, et le problème de fournir la quantité de vapeur nécessaire à la marche de la machine put alors être abordé avec des chances sérieuses de succès. En effet, en 1829, la compagnie du chemin de fer entre Liverpool et Manchester ouvrit un concours pour la construction d'une machine locomotive destinée à remplacer les machines fixes qu'on employait pour remorquer les wagons. L'ingénieur anglais Stephenson remporta le prix, et sa machine fut d'ailleurs construite avec un degré de perfection telle, que depuis lors on n'a eu à y apporter que des améliorations de détail.

387. Idée générale de la locomotive. — Une locomotive se compose essentiellement d'un châssis en fer ou en bois garni de fer, appuyé, par l'intermédiaire de forts ressorts en acier, sur les essieux de trois ou quatre paires de roues. Ce châssis supporte une chaudière, sur les côtés de laquelle sont deux machines à vapeur à cylindre horizontal. Les pistons sont articulés à des bielles qui agissent soit sur des parties coudées des essieux d'une paire de roues, qu'on appelle les roues motrices, soit sur les rayons mêmes de ces roues, de façon à mettre celles-ci en mouvement. La première disposition s'emploie quand le mécanisme est intérieur au châssis, ce qui a lieu dans le plus grand nombre des anciennes machines; la seconde, lorsque le mécanisme est extérieur. Comme on ne peut pas employer ici de volant, on obvie aux variations de vitesse en croisant les manivelles de façon que le point mort de l'une corresponde au maximum d'effet de l'autre.

1. Sur une chaussée horizontale pavée en carreaux de grès et en bon état, le rapport du tirage à la charge totale est 0,060; sur un chemin de fer, elle atteint à peine 0,005.

La locomotive est suivie d'une sorte de wagon, appelé *tender*, contenant la provision d'eau et de charbon ; une pompe alimentaire adaptée à chaque machine, et mise en mouvement par la tige du piston, fait arriver continuellement l'eau du tender dans la chaudière. On remplace graduellement aujourd'hui ces pompes par des injecteurs. Enfin un mécanisme particulier permet au mécanicien de changer la distribution de la vapeur, et, par suite, de faire marcher à volonté la machine dans un sens ou dans l'autre.

388. Calcul de la vitesse et de la traction. — On supposait autrefois que, pour que le mouvement du convoi pût résulter de celui des roues motrices, il fallait que celles-ci eussent un point d'appui direct, de façon à ne pas tourner sur elles-mêmes. C'est ainsi qu'on fut amené à canneler les rails ou à disposer sur la voie une crémaillère engrenant avec une roue mise en mouvement par la machine. L'expérience a montré que ces moyens, d'ailleurs fort incommodes, sont inutiles, et que l'adhérence sur les rails, résultant du poids de la locomotive, est généralement suffisante pour déterminer le mouvement du convoi; seulement, pour que ce but soit bien certainement atteint, on a été conduit à donner aux locomotives un poids très-considérable, et qui peut quelquefois dépasser 30 tonnes.

Si l'on admet qu'il n'y ait aucun glissement, à chaque double coup de piston, la roue motrice fera un tour, et, par conséquent, la machine progressera d'une quantité égale à la circonférence. Supposons, par exemple, que la roue motrice ait $1^m,40$ de diamètre, et que le nombre de coups doubles de piston soit de trois par seconde; pendant ce temps la machine parcourra un espace égal à

$$\pi \cdot 1^m,40 \cdot 3 = 13^m,20,$$

ce qui fait environ 47,500 mètres, ou près de 12 lieues dans une heure.

Quant à la force de traction nécessaire pour remorquer un convoi, on peut la déduire facilement du résultat cité précédemment, que, sur les rails secs et de niveau, le rapport du tirage à la pression est d'environ 0,005, et de cet autre fait qu'une loco-

motive ne peut agir sur une résistance supérieure au sixième de son poids. D'après cela, une locomotive du poids de 20 tonnes pourra produire une traction de $\frac{20}{6}$, et par conséquent pourra remorquer un convoi d'un poids égal à $\frac{20}{6} \cdot \frac{1000}{5} = 666$ tonnes.

En rendant solidaires toutes les roues de la machine, de façon qu'elles reçoivent simultanément le mouvement du piston, on peut augmenter la résistance, d'autant plus d'ailleurs qu'il y a un plus grand nombre de roues; c'est pour cela que dans les machines destinées à remorquer des convois de marchandises, ou quand il s'agit de gravir des pentes un peu fortes, on diminue le diamètre des roues et on en augmente le nombre, que l'on porte quelquefois jusqu'à quatorze.

Lorsque, par suite de circonstances météorologiques, telles que le givre ou le brouillard, les rails sont devenus glissants, ou bien quand le convoi est trop fortement chargé, il y a un peu de temps perdu dans le mouvement, les roues tournent sur elles-mêmes, on dit alors que la machine *patine*.

389. Description de la locomotive de Stephenson. — La figure 329 représente une coupe de la locomotive à six roues de Stephenson. Le corps de la chaudière a la forme d'un cylindre dont le fond plat, situé du côté de l'avant, forme l'une des parois d'un espace situé à la base de la cheminée, et qu'on appelle la *boîte à fumée*. En arrière se trouve un autre espace, ayant la forme de la boîte à fumée, mais toutefois un peu plus grand; c'est la *boîte à feu*, ou le foyer. La chaudière et, par suite, l'eau enveloppent le foyer de toutes parts, excepté dans la partie correspondant à la porte. Le combustible, qui est ordinairement le coke, est placé directement sur la grille, et les escarbilles tombent sur la voie. Des tubes de bronze, solidement rivés aux parois de la chaudière, établissent la communication entre la boîte à feu et la boîte à fumée, et c'est en les parcourant dans toute leur longueur que les divers produits de la combustion peuvent s'échapper. Ces tubes sont très-nombreux, il y en a jusqu'à 150 ou 180; on a donc ainsi une surface de chauffe extrêmement considérable, ce qui, comme nous l'avons dit, est absolument indispensable.

L'eau s'élève dans la chaudière de manière à couvrir tous les tubes, ainsi que la paroi supérieure de la boîte à feu. Un indicateur du niveau est placé sous les yeux du chauffeur ; il y a, en outre, deux robinets qui correspondent l'un à l'eau, l'autre à la vapeur ; suivant les besoins de l'alimentation on fait varier l'ouverture d'un robinet placé dans le tube *e'* qui va puiser l'eau au tender.

La prise de vapeur se fait par le tube *p* à la partie supérieure

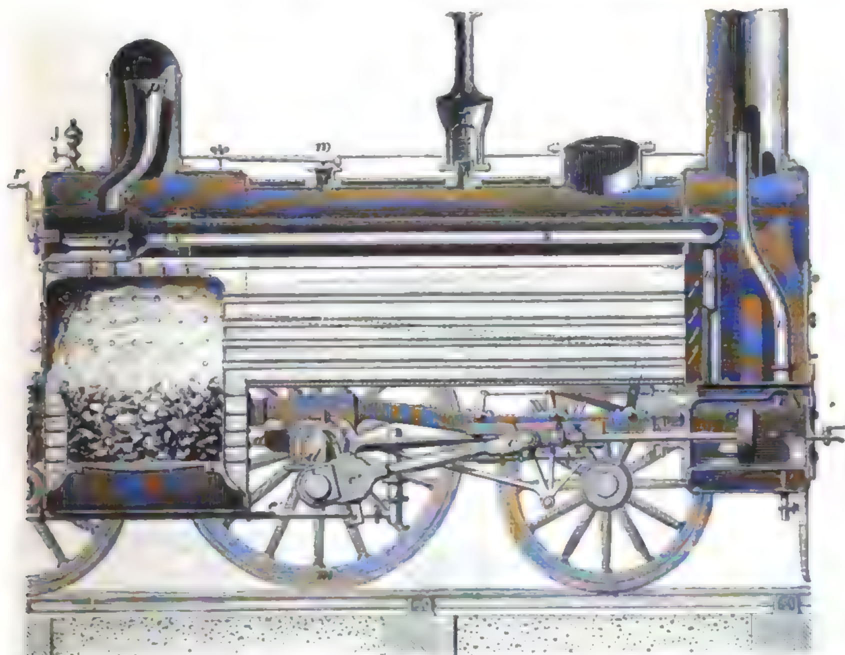


Fig. 329. — Locomotive de Stephenson.

d'un dôme ; de cette façon, on n'a pas à craindre que, par suite du mouvement de l'appareil, il s'introduise avec la vapeur des gouttelettes d'eau, circonstance toujours fâcheuse.

La vapeur se rend dans deux boîtes de distribution par le tube *s*, qui traverse la chaudière dans toute sa longueur, et à l'origine duquel est une ouverture *q* que l'on peut ouvrir de quantités variables à l'aide de la clef *r*. Un cadran, gradué à l'extérieur, montre le degré d'ouverture ; ce mécanisme porte le nom de régulateur.

Dans la boîte de distribution se meut un tiroir à coquille par le jeu duquel la vapeur se rend successivement au-dessus et au-

dessous du piston *a*; la vapeur expulsée se rend dans le tube *v*, d'où elle s'échappe périodiquement dans la cheminée. Cette circonstance est très-importante: elle active singulièrement le tirage, et permet de diminuer beaucoup la hauteur de la cheminée.

La tige *b* du piston s'articule avec la bielle *cc'*, articulée elle-même avec la portion coudée de l'essieu des roues motrices *m*: *w* est une soupape de sûreté à ressort et J le sifflet à vapeur.

390. Marche à contre-vapeur. — Coulisse de Stephenson. — Il est important que le mécanicien puisse faire mouvoir la locomotive dans un sens ou dans un autre, à l'aide d'une manœuvre simple et facile à exécuter. Divers moyens ont été proposés dans ce but; nous nous bornerons à faire connaître la coulisse de Stephenson.

La coulisse de Stephenson a un double but: le premier est de déterminer à volonté le mouvement du tiroir pour la marche

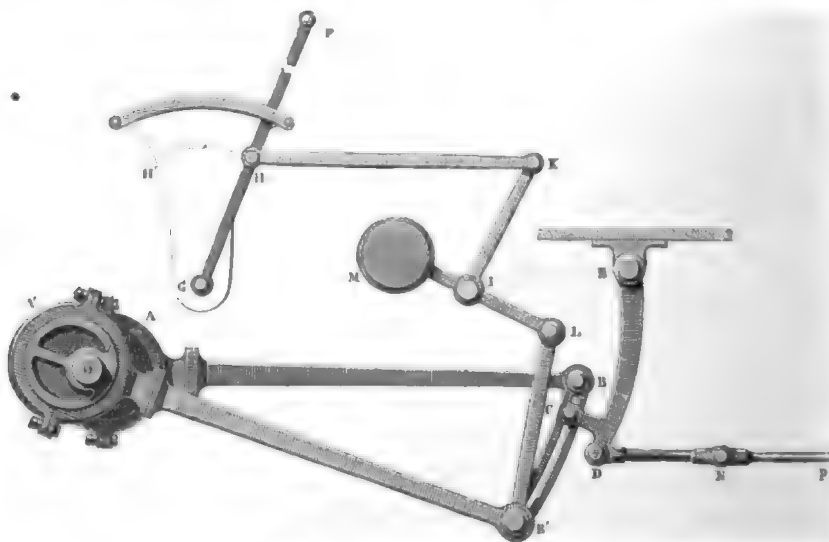


Fig. 330. — Coulisse de Stephenson.

en avant ou pour la marche en arrière; le second est de faire varier dans certaines limites la détente. Deux excentriques inverses A et A' ont leurs bielles articulées en B et B' aux deux extrémités d'une coulisse courbe. Dans cette coulisse est engagée une pièce C faisant partie d'un levier mobile autour du point fixe E et pouvant

y occuper diverses positions. L'extrémité D du levier DE s'articule avec la bielle DN qui dirige la tige P du tiroir. Cette même coulisse est suspendue à un système LIMK, qui permet de l'élever ou de l'abaisser à l'aide d'une manette GHF à la disposition du mécanicien. Lorsque la coulisse est complétement abaissée, l'extrémité B de la bielle, menée par l'excentrique A, est très-près de la pièce C qui dirige le tiroir; celui-ci, qui d'ailleurs ne peut se mouvoir qu'en ligne droite, obéit donc à peu près exclusivement à l'excentrique A; c'est le contraire quand la coulisse est complétement élevée. Dans le premier cas, la locomotive marche dans un sens; dans le second cas, elle marche dans le sens opposé. Si la coulisse est dans une position intermédiaire, le tiroir est mené à la fois par les deux excentriques. Si par exemple on le plaçait exactement au milieu, le tiroir ne se déplacerait pas, la distribution n'aurait pas lieu, et, par suite, la machine s'arrêterait. D'après cette disposition, on voit que la course du tiroir sera d'autant plus restreinte que le bouton sera placé plus près du milieu de la coulisse, et il est facile de comprendre que le temps pendant lequel se fait la détente sera plus considérable, puisque, le temps de la course ne changeant pas, la longueur de celle-ci sera plus petite. La coulisse de Stephenson fournit donc un moyen de faire varier la détente; ce moyen, imparfait, il est vrai, à certains égards, est d'une si remarquable simplicité qu'il a été généralement adopté.

391. Types de locomotives. — La locomotive de Stephenson a reçu depuis son origine de très-grands perfectionnements[1] qui ne sauraient être décrits ici; nous nous bornerons à dire qu'on distingue trois types de locomotives: 1° machines à grande vitesse; 2° machines mixtes; 3° machines à marchandises. Le type le plus connu de la première catégorie est la machine Crampton, employée pour le service des trains express sur les lignes du Nord et de la Méditerranée. Les roues motrices sont à l'arrière, ce qui permet de leur donner un grand diamètre sans trop élever le centre de gravité et, par suite, sans nuire à la stabilité du système.

Le poids d'une machine Crampton est de 28 tonnes environ;

1. Nous renvoyons le lecteur au *Traité élémentaire des chemins de fer* de Ledieu.

le tender avec sa provision de charbon, 18 tonnes; total, 46 tonnes.

Les machines mixtes sont destinées à remorquer les trains de voyageurs à petite vitesse, ce que l'on appelle les trains omnibus; elles ont en général deux roues couplées avec les roues motrices, ce qui donne une adhérence correspondante à la charge de deux essieux. Leur poids moyen est de 20 tonnes; celui du tender, 14. Les machines à marchandises sont à six roues couplées, quelquefois à sept et même à huit. Telles sont les machines de l'ingénieur autrichien Engerth, destinées à gravir des pentes exceptionnelles sur le chemin de fer de Trieste. Dans les Engerth le poids même de la machine est de 40 tonnes; celui du tender, 22.

Il y a encore un quatrième type de machines, qui portent leur tender ou magasin d'approvisionnement en eau et en charbon. Ce sont des locomotives-tender, machines de gare. Quelques-unes font le service sur les chemins de fer de banlieue, de Saint-Germain et de Versailles.

La vapeur est produite en général dans les locomotives à la pression de 5 atmosphères; elles consomment en moyenne de 7 à 8 kilogrammes de coke par kilomètre sur une route de niveau, sauf toutefois les Engerth, dont la consommation est à peu près double.

Quant à la puissance de la machine, elle est proportionnelle à la fois à la vitesse et à la charge qu'elle doit traîner. Ainsi une locomotive Crampton de 200 chevaux remorque un train de 40 tonnes avec une vitesse de 56 kilomètres à l'heure; une locomotive à marchandises de même force remorque un train de 200 tonnes avec une vitesse environ cinq fois plus faible.

392. Travail fourni par la machine à vapeur. — Le travail fourni par la machine à vapeur a pour origine la conversion de la chaleur en travail mécanique. Il est facile d'évaluer au moins approximativement quelle est la portion de chaleur qui subit cette transformation. Supposons, en effet, une machine arrivée à son état de régime régulier et normal, on peut exactement mesurer la quantité de vapeur qu'elle consomme pour un nombre déterminé de coups de piston. Connaissant la température et la pression de cette vapeur, les coefficients physiques déterminés par M. Regnault

permettent d'évaluer, avec une très-grande précision, la quantité de chaleur qu'il a fallu employer pour porter l'eau d'alimentation de la chaudière à l'état de vapeur telle qu'elle se trouve dans le corps de pompe. D'autre part, si on mesure la quantité d'eau qui arrive au condenseur ainsi que son élévation de température, on en déduira la quantité de chaleur que possédait la vapeur au moment où elle a été expulsée du corps de pompe. D'après les anciennes idées sur la chaleur, ces deux quantités devraient être égales, et pendant longtemps on a admis cette égalité; mais l'expérience prouve irréfutablement qu'il n'en est rien : il y a constamment, invariablement, disparition d'une certaine quantité de chaleur. C'est précisément cette quantité de chaleur perdue qui correspond au travail produit dans le cylindre de la machine. Ce travail peut être mesuré directement par des méthodes appropriées, et on a ainsi un moyen de calculer ce qu'on appelle l'équivalent mécanique de la chaleur.

Des expériences de cette nature ont été faites avec des machines de différents systèmes, et bien que les résultats obtenus ne soient pas très-concordants, on peut en déduire assez sûrement que la quantité de chaleur convertie en travail ne dépasse pas $\frac{1}{7}$. Ce nombre est véritablement très-faible, et il est curieux de remarquer que, dans le moteur le plus puissant et le plus répandu de l'industrie, les $\frac{6}{7}$ du travail que renferme la chaleur produite sont perdus.

Il importe toutefois de ne pas se méprendre sur ce que signifie exactement ce faible rendement économique de la machine à vapeur. En définitive, ce qui importe industriellement, c'est le prix de revient de l'unité de travail; or ce prix est incontestablement moindre avec la machine à vapeur qu'avec les autres systèmes qu'on a essayé jusqu'à présent de lui substituer. Il importe dès lors fort peu que la proportion de chaleur convertie en travail soit faible, si en réalité ce travail est économiquement obtenu. Ainsi, par exemple, dans les machines électro-motrices, la proportion de chaleur convertie en travail est beaucoup plus forte, et pourtant, en tenant compte du procédé employé, l'unité de tra-

vail est près de trente fois plus chère qu'avec la machine à vapeur.

393. Machines à gaz. — Les machines à gaz reposent toutes sur le principe de la combustion d'un gaz combustible, qui est ordinairement le gaz de l'éclairage, par l'oxygène de l'air ; cette combustion produit un accroissement de pression et de volume de ces gaz ; de là un travail disponible que l'on peut recueillir sur un piston et transmettre aux outils que l'on veut faire marcher. Les machines à gaz présentent, dans les villes où se trouvent des usines de fabrication de gaz de l'éclairage, des avantages précieux :

1° Suppression des craintes d'explosion ;

2° Suppression des craintes d'incendie ;

3° Facilité et promptitude de la mise en mouvement des appareils, sans aucune perte de temps, ce qui n'a pas lieu avec les machines à vapeur, pour lesquelles il faut attendre que la chaudière soit en pression pour mettre en marche le moteur ;

4° Surveillance beaucoup moindre qu'avec les machines à vapeur.

A raison de ces avantages, et plus particulièrement des derniers, ces machines se sont très-répandues dans la petite industrie et dans les cas où le travail doit être intermittent. Mais il faut bien remarquer que ces avantages sont tout à fait subordonnés au fait de la fabrication du gaz dans une usine distincte. Si on devait faire soi-même le gaz destiné à la machine, on retrouverait tous les inconvénients et les dangers que peut offrir la machine à vapeur.

Les machines à gaz présentent deux modes d'action distincts. Dans les unes, l'air s'introduit avec l'hydrogène alternativement d'un côté et de l'autre du piston ; le mélange est enflammé, soit par une étincelle d'induction (moteur Lenoir), soit directement par un bec allumé et mobile (machine Hugon). Les proportions ne sont pas d'ailleurs celles d'un vrai mélange détonant ; il n'y a pas, à proprement parler, explosion, mais seulement combustion qui échauffe la masse gazeuse et détermine le mouvement du piston. Ces machines ne sont à vrai dire que des machines à air chaud, dans lesquelles la combustion de l'hydrogène n'intervient que comme un moyen d'élever la température. Elles sont, absolument parlant, peu économiques ; leur consommation s'élève, en effet, de 2600 à

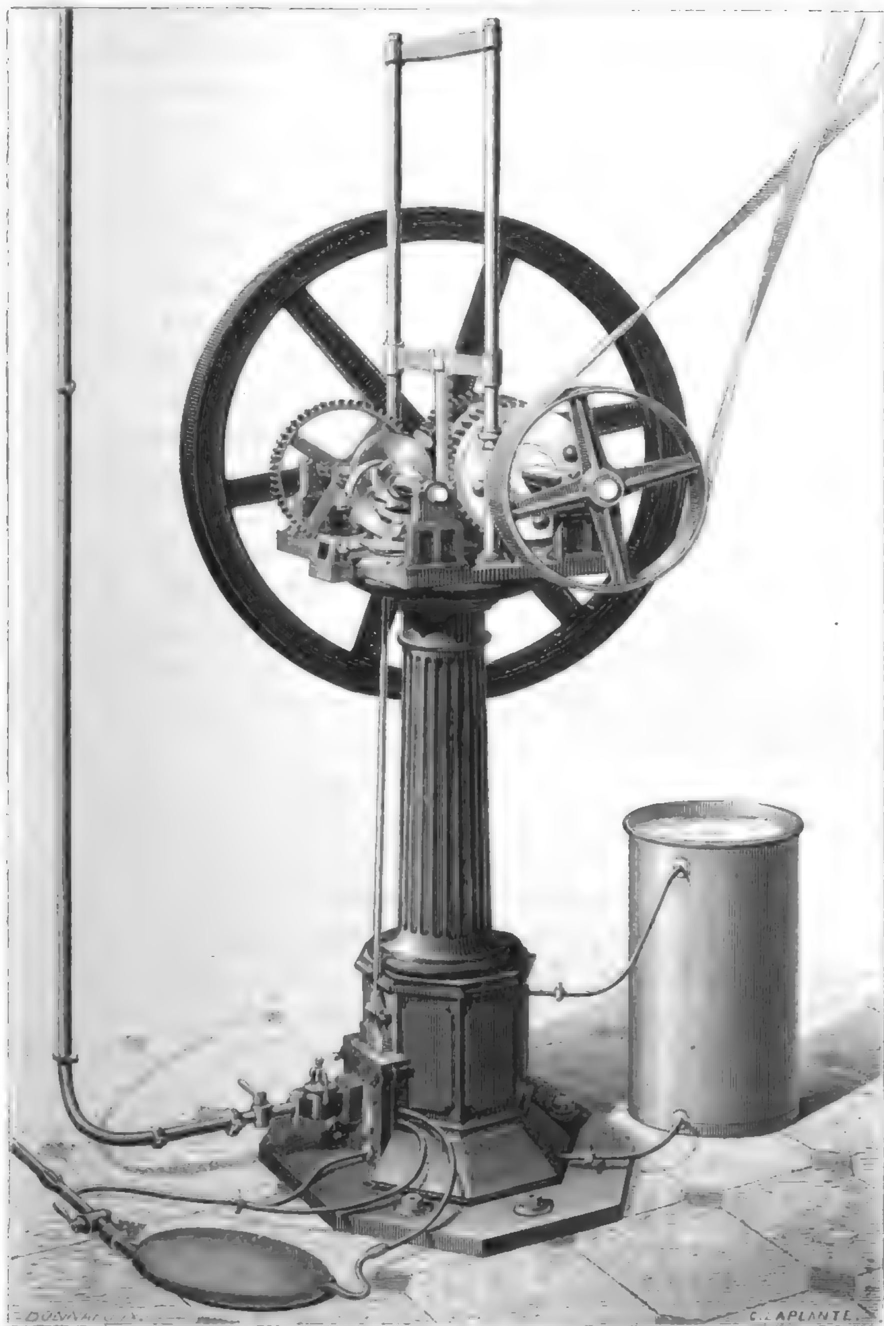


Fig. 331. — Machine à gaz de MM. Otto et Langen.

3000 litres de gaz par cheval et par heure, ce qui donne un travail 7 à 8 fois plus cher, en moyenne, que celui des machines à vapeur; elles consomment en outre une très-grande quantité d'eau pour le refroidissement du corps de pompe.

On obtient au moins, quand on n'a besoin que de petites forces, des résultats beaucoup plus avantageux des machines à simple effet. Supposons qu'au-dessous du piston on détermine l'inflammation du mélange détonant; il y aura refoulement brusque du piston, et cette partie du mouvement sera difficile à utiliser; mais après la condensation de la vapeur d'eau et le refroidissement des autres produits de la combustion, l'action de l'atmosphère devient prédominante et détermine le mouvement de retour du piston; c'est une sorte de machine atmosphérique analogue à celle de Newcomen.

C'est une machine de ce genre que représente la figure 331; elle est due à MM. Otto et Langen et présente une économie remarquable. D'après des expériences prolongées pendant longtemps sa consommation peut être évaluée, au maximum, à 1000 litres de gaz par cheval et par heure; c'est à peu près trois fois moins que ne dépensent les moteurs Lenoir et Hugon.

Elle se compose d'un corps de pompe vertical, ouvert à sa partie supérieure, dans lequel se meut le piston; le gaz arrive à la partie inférieure par un tube, et avec lui de l'air qui s'introduit par une ouverture convenable au moment de l'aspiration. Le mélange est enflammé par un bec allumé et placé dans une position fixe; mais il faut pour cela qu'une communication s'établisse de là aux lumières que présente la partie inférieure du corps de pompe. C'est la fonction qu'accomplit une plaque percée d'un orifice et menée par l'un des excentriques calés sur l'arbre de l'appareil. L'explosion chasse brusquement le piston, dont la tige, façonnée en crémaillère, agit sur une roue dentée; mais celle-ci est calée sur l'axe, de façon à tourner comme poulie folle sur lui dans le mouvement ascendant du piston, tandis que dans le mouvement inverse l'axe est entraîné avec le volant qui le termine; le mouvement dû à l'explosion est donc éliminé et la machine n'utilise que celui qui provient de la pression atmosphérique. Le second excen-

trique que l'on voit sur la figure est destiné à soulever le piston au-dessus de la base du corps de pompe et à l'amener au point qui correspond à l'inflammation du mélange. Le vase qu'on voit à droite de la figure renferme de l'eau froide que l'on fait circuler autour de la partie inférieure du corps de pompe pour le refroidir; la consommation en est d'ailleurs presque insignifiante et très-inférieure, en tout cas, à celle que nécessitent les moteurs à gaz ordinaire.

Le gaz arrive à la machine par trois tubes: l'un sert à l'alimentation du bec allumé; le second correspond à l'espace dans lequel se meut la coulisse de distribution; le troisième sert à alimenter le corps de pompe lui-même. Pour ce dernier objet, on interpose sur le trajet une vessie en caoutchouc qui, au moment de l'aspiration, fournit la quantité de gaz nécessaire.

Cette machine, remarquable par sa simplicité, a toutefois l'inconvénient d'être fort bruyante, par suite du refoulement brusque dû à l'explosion; l'intermittence des effets donne lieu d'ailleurs à des chocs qui doivent être une cause d'usure et de fatigue pour le mécanisme.

CHAPITRE XXXIV.

TEMPÉRATURES TERRESTRES.

394. Manière d'observer la température de l'air. — La température accusée par un thermomètre placé dans l'air dépend très-sensiblement de la position qu'il occupe. Lorsqu'on veut observer la température de l'air dans un lieu, comme élément météorologique, il faut tâcher de se mettre à l'abri, autant que possible, de tout ce qui constitue une influence particulière déterminée, de façon que l'indication ait un caractère local. Il va sans dire que le thermomètre doit être placé à l'ombre; de plus, il doit être exposé au nord, élevé au-dessus du sol d'environ 2 mètres, et éloigné de tout objet qui pourrait diffuser sur lui les rayons solaires. Il peut être utile de disposer au-dessus et au-dessous de lui deux plateaux de bois, ou de le placer dans une sorte de cage à jalousies qui laisse circuler l'air tout en protégeant l'instrument contre l'action du rayonnement extérieur. Enfin il est important de ne pas se borner à l'observation d'un seul thermomètre, il convient d'en installer plusieurs à peu de distance les uns des autres. Il est clair que si l'indication a pour cause unique l'état thermométrique de l'air, les divers instruments devront s'accorder; si un désaccord se produit, il ne peut que tenir à quelque cause spéciale qu'il faudra s'attacher à reconnaître.

395. Température moyenne d'un lieu. — Si l'on imagine que dans le cours d'une journée on fasse un très-grand nombre d'observations thermométriques, qu'on ajoute toutes les températures et qu'on divise par le nombre des observations, on aura

la température moyenne du jour. Cette moyenne est d'autant plus exacte que le nombre des observations est plus grand ; pour avoir la moyenne rigoureuse, il faudrait pour ainsi dire faire une infinité d'observations à chacun des instants de la journée.

On a essayé diverses méthodes pour déduire la température moyenne d'un petit nombre d'observations. On obtient, à ce qu'il paraît, un résultat assez satisfaisant en observant à 4 heures et à 10 heures du soir, à 4 heures et à 10 heures du matin, et prenant le quart de la somme des températures. Quelques observateurs préfèrent les trois observations de 6 heures du matin, 2 heures et 10 heures du soir. Il était assez naturel de penser que la moyenne des températures maxima et minima de la journée doive donner la température moyenne du jour, mais l'expérience a montré qu'il n'en est rien et que l'on obtient ainsi un résultat beaucoup moins approché que par les méthodes précédentes. Quoi qu'il en soit, aujourd'hui que l'usage des thermométrographes est devenu tout à fait général, la température moyenne s'obtient sans difficulté avec autant de précision que l'on veut.

Si l'on fait la somme des températures moyennes de chaque jour du mois et qu'on divise par 30, on obtient la *moyenne mensuelle*.

La somme des douze moyennes mensuelles divisée par 12 donne la *moyenne annuelle*.

Enfin, si l'on prend la moyenne d'un certain nombre de moyennes annuelles, on obtient ce que l'on appelle la température moyenne du lieu. Cette température est fixée avec d'autant plus de précision que le nombre des observations annuelles est plus considérable. A Paris, par exemple, le résultat d'un demi-siècle environ d'observations donne pour la température moyenne 10°,67.

La température moyenne d'un lieu est évidemment un élément local spécifique, elle contribue à caractériser ce que dans le langage ordinaire on appelle *climat*, mais son influence n'est pas la seule, ni peut être la plus importante. La force et la direction des vents dominants, l'état hygrométrique de l'air, le régime et la fréquence des pluies, contribuent pour une grande part à un ensemble d'impressions que nous attribuons à un climat déterminé. Il n'est

pas inutile non plus de tenir compte de ces circonstances assez peu connues au fond, mais qui font dire qu'un climat est *sain* ou *malsain*.

396. Lignes isothermes. — Les lignes isothermes sont les lignes que l'on obtient en réunissant par un trait continu les points qui ont la même température moyenne. De Humboldt, le premier, en 1817, est parvenu, à l'aide des documents qu'il a pu recueillir, à tracer des isothermes de 5 en 5 degrés, et s'étendant sur la plus grande partie de la surface terrestre. Depuis cette époque, les observations se sont multipliées et le parcours de ces courbes peut être considéré comme suffisamment connu. Leur examen donne lieu à quelques observations importantes. En général, elles sont assez irrégulières dans leurs allures, ce qui s'explique par le nombre d'éléments divers qui influent sur la température moyenne ; mais malgré cette irrégularité on peut constater qu'elles sont inclinées par rapport aux parallèles géographiques et qu'elles s'approchent de l'équateur en Asie et en Amérique, ce qui indique que ces deux continents sont plus froids que l'Europe. A mesure qu'on s'approche du pôle boréal, les isothermes paraissent présenter deux inflexions qui se rapprochent de plus en plus l'une de l'autre de manière à former une espèce de ∞. Cette circonstance curieuse conduit à penser qu'il existe dans les régions boréales deux pôles de froid. L'un serait, suivant M. Kaemtz, au nord du détroit de Barrow, en Amérique, l'autre en Sibérie, à l'est du cap Taymour. Mais ce qu'il y a de curieux et d'important, c'est qu'ils ne coïncident ni l'un ni l'autre avec le pôle géographique, qui se trouve placé à peu près à égale distance entre les deux. Le pôle géographique n'est donc pas le point le plus froid du globe terrestre, et il est certain que dans les diverses expéditions qui ont été faites dans les régions arctiques, on a atteint des points où la température est plus rigoureuse qu'elle ne l'est au pôle géographique. C'est une des raisons qui donnent quelque consistance à l'espoir, si souvent déçu toutefois, d'atteindre le pôle boréal du globe terrestre.

397. Lignes isochimènes et isothères. — La température moyenne de deux lieux pourrait être la même, bien que les températures moyennes de l'été et de l'hiver fussent très-différentes ; il

suffirait, par exemple, qu'à une température plus élevée de l'été correspondît une température plus basse de l'hiver, pour que la moyenne ne fût pas modifiée. Il est évident que la valeur absolue des températures hibernales et estivales influe notablement sur le climat et qu'elle a une grande influence sur les conditions d'existence et de développement des êtres organisés. C'est pour cela que les météorologistes ont eu l'idée de tracer des courbes qui passent par les différents lieux dont la moyenne estivale et hibernale est la même. Les premières se nomment lignes isothères; les secondes, lignes isochimènes. La considération de ces lignes a une certaine importance dans les questions de géographie zoologique ou botanique. Ainsi, par exemple, si certaines espèces animales redoutent le froid, la limite des régions qu'ils peuvent habiter devra se terminer vers le nord par une ligne isochimène. De même, les plantes annuelles, comme les céréales, qui se développent seulement dans le printemps et l'été, sont subordonnées, non pas à la température de l'hiver, ni même à la température moyenne, mais bien à la température de l'été[1]. Aussi, si on considère leurs limites vers le nord, on les trouve sensiblement situées sur une ligne isothère.

398. Extrêmes de températures. — Indépendamment de la valeur moyenne, il est évident que les températures extrêmes que l'on peut observer en différents lieux ont une influence considérable sur le climat. Il est à remarquer que l'organisation de l'homme le rend plus propre que tout autre animal à supporter des températures très-diverses. Suivant M. Kaemtz, une température de — 56° aurait été supportée par Back au fort Reliance, tandis que Barkoot aurait éprouvé en Égypte une température de + 47°, ce qui fait une différence de 104°, supérieure, par conséquent, à celle qui existe entre la glace fondante et l'eau bouillante. L'homme paraît donc seul capable de vivre sous toutes les latitudes; il n'en est pas moins constant toutefois que les climats tempérés sont les plus

1. Dans la construction des isothères et des isochimènes, on considère comme température hibernale celle de l'automne et de l'hiver, et comme température estivale celle du printemps et de l'été.

favorables au plein développement de ses facultés physiques et intellectuelles.

399. Climats marins et climats continentaux. — Sous le rapport des extrêmes de température, aussi bien que des moyennes hibernales et estivales, il existe de très-grandes différences dans les divers pays. Dans les contrées voisines des grandes masses d'eau, les variations de température se trouvent notablement restreintes : les étés y sont moins chauds et les hivers moins froids ; ce fait est marqué surtout dans les îles de peu d'étendue, et se vérifie néanmoins sur toutes les côtes. On désigne sous le nom de *climats marins* ceux dans lesquels se trouve une petite différence entre les moyennes de l'été et de l'hiver. Les *climats continentaux* correspondent à des différences plus prononcées, qui tiennent à l'absence des grandes masses d'eau. Ainsi, par exemple, en Angleterre, le thermomètre ne descend qu'exceptionnellement à 10° au-dessous de 0 ; à la même latitude, dans l'Amérique russe, le mercure reste congelé en hiver pendant plusieurs semaines.

Voici quelques exemples de ces deux sortes de climats.

CLIMATS MARINS.	Hiver.	Été.	Différence.
Iles Féroë.	3°,90	11°,60	6°,70
Ile Unst (Shetland). . . .	4,05	11,92	7,87
Ile de Man.	5,59	15,08	9,49
Penzance	7,04	15,83	8,79
Helston.	6,19	16,00	8,81
CLIMATS CONTINENTAUX.			
Pétersbourg.	— 8°,70	15°,96	23°,66
Moscou.	— 10,22	17,55	27,77
Kasan.	— 13,66	17,35	31,11
Slatoust.	— 16,49	16,08	32,57
Irkutzk	— 17,88	16,00	33,88
Jakousk	— 38,90	17,20	56,10

400. Températures du sol à diverses profondeurs. — Couche invariable. — Lorsqu'on observe, à l'aide d'instruments convena-

bles, la température du sol à diverses profondeurs, on reconnaît que les variations, soit diurnes, soit annuelles, de la température s'y font sentir, mais avec des particularités curieuses. Ainsi, d'une part, l'amplitude de ces variations est moindre et d'autant plus qu'on pénètre plus profondément dans le sol. A une certaine profondeur, variable du reste d'un pays à l'autre, cette amplitude devient tout à fait nulle, c'est-à-dire, en d'autres termes, que la température devient constante : c'est ce que l'on appelle la couche invariable. Dans cette couche il n'y a plus de trace de variations diurnes ou annuelles; mais les premières disparaissent bien avant les secondes, et il suffit, en réalité, de pénétrer dans le sol à une profondeur médiocre pour que les inégalités de température de la journée cessent complétement de se faire sentir.

En second lieu, les variations de température observées dans l'intérieur du sol sont toujours en retard sur les variations correspondantes de la surface, ce qui s'explique naturellement par le défaut de conductibilité des matériaux qui constituent la croûte superficielle du globe. Ce retard augmente à peu près proportionnellement à la profondeur, si bien qu'à une profondeur déterminée ce retard devient à peu près égal à la moitié de l'année. Dans cette couche, les maxima de température correspondent donc aux minima de l'air et *vice versâ*, c'est-à-dire que les saisons sont renversées. Mais il faut dire qu'elles y sont très-peu accentuées et à peine sensibles. Dans nos climats, ce phénomène de renversement se rencontre à 8 ou 10 mètres de la surface du sol.

D'après quelques observations, qui auraient peut-être besoin d'être contrôlées, la moyenne annuelle paraît avoir la même valeur dans toutes les couches où se font sentir les variations; de là résulte une conséquence intéressante et qui est généralement admise : c'est que la température de la couche invariable est précisément la température moyenne du lieu. Cette loi curieuse a permis de déterminer la température moyenne de diverses localités dans lesquelles on n'avait pas fait d'observations suivies du thermomètre.

Les sources qui conservent à peu près la même température pendant l'année sont considérées assez généralement comme ayant une température égale à la moyenne du lieu, mais cette conclusion

est très-incertaine. Les sources étant en effet alimentées par les pluies, doivent être refroidies ou échauffées par elles suivant les circonstances. En outre, les canaux qui les amènent à la surface peuvent pénétrer dans le sol à une profondeur considérable, et y subir nécessairement l'influence de la chaleur centrale du globe.

A Paris, la couche invariable est à une vingtaine de mètres de la surface. Dans les caves de l'Observatoire, dont la profondeur est de 27m,60, la température, absolument constante, mais un peu supérieure à la température moyenne, est égale à 11°,82. Le thermomètre installé par Lavoisier en 1783 n'a pas, depuis cette époque, subi de variations qui atteignent $\frac{1}{4}$ de degré.

401. Chaleur centrale du globe. — Au-dessous de la couche invariable, la température va en augmentant d'une manière continue avec la profondeur. C'est ainsi que les eaux du puits de Grenelle, par exemple, qui jaillissent d'une profondeur de 548 mètres, ont une température de 27°,7, ce qui correspond à un accroissement de 1 degré par 33 mètres environ à partir de la couche invariable. En supposant que cette progression se maintienne, on atteindrait une température d'environ 2000° à 60 kilomètres de profondeur. A cette profondeur, toutes les matières que nous connaissons seraient liquéfiées, de sorte que l'on serait conduit à admettre que toute la masse du globe serait en fusion et qu'il y aurait seulement à la surface une pellicule dont l'épaisseur est à peine la centième partie du rayon.

Cette conclusion est assez généralement admise par les géologues, mais c'est bien plus une sorte d'hypothèse *à priori* qu'une conséquence de l'observation. Étendre en effet à la totalité du rayon terrestre, c'est-à-dire à 1500 lieues environ, une loi observée dans une étendue de 4 à 500 mètres, est un procédé peu conforme à la logique. En réalité, c'est le phénomène de l'aplatissement de la terre qui a donné lieu à la supposition de la liquidité primitive de notre globe, sur laquelle on a fondé toute une théorie qui ne saurait être acceptée qu'avec des réserves importantes. Sans aucun doute, les volcans nous donnent la preuve qu'il existe dans le sein de la terre des matières à l'état de fusion ignée, mais ce peuvent être là des

phénomènes locaux, difficiles à expliquer sans doute, mais moins toutefois que le fait de la liquidité du noyau terrestre.

402. Décroissement de la température avec la hauteur. — A mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, la température diminue et cela pour des causes diverses. Ainsi l'air, diminuant de densité, absorbe naturellement une proportion moindre des rayons solaires ; en outre, il n'éprouve pas l'action réchauffante du sol, qui joue un rôle considérable à la surface de la terre. Sur le sommet des montagnes, d'autres causes de refroidissement interviennent, par exemple l'intensité de l'évaporation, la facilité du rayonnement à travers une atmosphère plus rare et le mouvement de l'air qui, échauffé sur les pentes, s'élève en glissant sur elles et vient se dilater en se refroidissant au sommet. Rien n'est donc plus simple à comprendre que le décroissement de la température avec la hauteur, mais on comprend aussi que, ce décroissement dépendant de causes diverses et dont quelques-unes peuvent être très-variables, il soit difficile de trouver une loi précise, qui lie la variation de hauteur à la diminution de température. Aussi les diverses observations faites sur ce sujet sont-elles souvent très-discordantes. Ainsi, par exemple, Gay-Lussac, dans son célèbre voyage aérostatique de 1804, a trouvé à la hauteur de près de 7000 mètres, à laquelle il est parvenu, une variation de température de 40°, ce qui fait environ 1 degré pour 173 mètres d'élévation. MM. Barral et Bixio, dans une ascension faite en 1849, ont constaté, à une hauteur à peu près pareille, une température capable de congeler le mercure, ce qui fait, comparativement à la température de la surface du sol le jour de l'expérience, une variation d'environ 60°.

Toutefois, comme la loi de ce décroissement est fort importante à connaître pour le calcul des réfractions astronomiques, on a cherché à en trouver une expression plus ou moins approchée, en combinant les observations qui présentent le plus grand caractère de concordance, et on est arrivé à la proposition suivante, qu'il ne faut d'ailleurs admettre qu'avec réserve :

En supposant que la température du sol soit de 30°, à mesure qu'en s'élevant il s'établit une différence de pression de $0^{m},050$, il y a une variation correspondante de température de $0°,4$ (Saigey).

En combinant cette loi avec la formule de Laplace pour la mesure des hauteurs, on peut calculer, avec une certaine approximation, la température qui règne à une hauteur donnée.

C'est à raison de l'inégalité du décroissement de la température à mesure qu'on s'élève, que la limite des neiges perpétuelles varie de hauteur d'une contrée à l'autre; tandis qu'en Islande elle s'élève à peine à 900 mètres, dans l'Himalaya, dans les Andes elle dépasse 1500 mètres.

403. Des vents. — Les vents sont produits par le déplacement de l'air atmosphérique; ils sont toujours le résultat d'une rupture d'équilibre dans la densité de l'atmosphère. Si, par exemple, la densité ou la pression de l'air devient plus considérable en un certain point, l'air se déverse dans les régions voisines et donne lieu à un vent qui se propage dans le sens même de sa direction; c'est un vent d'*insufflation.* Si au contraire, par une cause quelconque, par suite, par exemple, de la condensation d'une grande masse de vapeur d'eau, il se produit quelque part une diminution de pression ou de densité, l'air environnant afflue pour rétablir l'équilibre. Cet appel se communique de proche en proche, et il en résulte un vent qui se propage en sens contraire de sa direction; c'est un vent d'*aspiration.*

La direction du vent, sa force ou sa vitesse, constituent un élément météorologique d'une très-grande importance que dans tous les observatoires on s'attache à mesurer avec beaucoup de soin. La direction s'obtient à l'aide de l'instrument connu de tout le monde sous le nom de *girouette.* Il est très-facile de modifier l'appareil de manière à lui faire enregistrer ses indications : il suffit, ainsi que cela se pratique dans plusieurs observatoires, de munir la partie inférieure de son axe d'un index métallique, qui passe successivement sur divers contacts électriques; à chacun de ces contacts correspond un organe traceur, mis en mouvement par le courant et qui laisse une trace sur une feuille de papier, qui se meut elle-même à l'aide d'un rouage d'horlogerie.

La force ou la vitesse du vent se mesure à l'aide des *anémomètres.* Ce sont des moulinets à ailettes dont l'axe engrène par une vis sans fin avec la première roue d'un compteur à rouages. On

peut ainsi, en faisant marcher l'instrument pendant un temps déterminé, savoir le nombre de tours du moulinet accomplis pendant ce temps. La vitesse du vent se déduit de ce nombre de tours à l'aide de tables spéciales que l'on construit directement et qui représentent la graduation de l'anémomètre.

Les vents reçoivent suivant leur vitesse des désignations spéciales. Quand cette vitesse est inférieure à 10 mètres par seconde, on les appelle *petite brise, jolie brise;* la *brise fraîche* correspond à une vitesse de 10 mètres, le *grand frais* à une vitesse de 20 mètres. Au-dessus, le vent devient dangereux en mer. La vitesse du vent peut atteindre 40 ou 50 mètres par seconde; il est alors capable de renverser les édifices, de déraciner les arbres et constitue un ouragan ou une tempête.

404. Causes des vents. — Il est à peu près impossible de donner une théorie générale des mouvements de l'atmosphère ; et quant aux influences locales qui modifient la direction ou l'intensité des vents, elles sont si diverses que leur étude est fort compliquée et ne peut trouver sa place que dans un traité spécial. Nous nous bornerons ici à indiquer une circonstance physique fondamentale, qui permet de se rendre compte, au moins approximativement, de l'origine des vents que l'on nomme réguliers. Cette circonstance se résume clairement dans l'expérience suivante, due à Franklin : On ouvre en hiver une porte de communication entre une chambre chaude et une chambre froide et on place deux bougies allumées, l'une en haut et l'autre en bas de la porte. On constate que la flamme de la bougie inférieure s'incline vers la chambre chaude, tandis que la bougie supérieure s'incline en sens inverse. En généralisant les conclusions de cette expérience on peut dire que : *Quand deux régions voisines sont inégalement chauffées, il s'établit à la partie supérieure un vent allant de la région chaude à la région froide et un vent inverse à la surface du sol.*

Nous allons appliquer cette proposition fort simple à l'explication des brises, des alizés et des moussons.

405. Brises. — Sur les côtes, quand le temps est calme, on observe, à partir de neuf ou dix heures du matin, un vent venant de

la mer, dont la force s'accroît jusque vers les deux ou trois heures. A partir de ce moment, il s'affaiblit, et cesse un peu avant le coucher du soleil, pour faire place quelques heures après à un vent de terre qui souffle à peu près jusqu'au lever du soleil. Ces vents, que l'on nomme la brise de terre et la brise de mer, se produisent avec une très-grande régularité ; mais ils peuvent souvent être masqués par l'existence d'autres vents soufflant en même temps qu'eux. L'origine de ces brises est très-simple : pendant le jour la terre s'échauffe plus que la mer, à raison du grand calorique spécifique de l'eau ; il doit donc se produire à la surface du sol un vent dirigé vers la région chaude, c'est-à-dire vers la terre. Pendant la nuit, la terre et la mer se refroidissent, mais la première plus que la seconde ; le vent de la surface du sol doit donc être dirigé vers la région chaude, c'est-à-dire vers la mer.

406. Vents alizés. — Les vents alizés sont des vents qu'on observe plus particulièrement dans l'Atlantique et qui dans notre hémisphère soufflent du nord-est au sud-ouest ; dans l'hémisphère austral ils soufflent du sud-est au nord-ouest. Les alizés se produisent avec une régularité absolue ; les marins peuvent compter sur eux aussi sûrement que sur le lever du soleil ; ils ne s'étendent d'ailleurs que fort peu au delà de la région intertropicale, et ce n'est qu'accidentellement qu'on peut les ressentir jusque vers le trentième degré de latitude. Les alizés frappèrent de terreur les compagnons de Christophe Colomb, qui se voyaient ainsi fermer pour ainsi dire le retour vers leur patrie.

Voici l'explication que l'expérience de Franklin peut suggérer au sujet des alizés ; elle est à peu près conforme du reste à celle qui a été donnée primitivement par Halley. La région équatoriale étant plus fortement échauffée par le soleil que les autres parties de la terre, il se produit sur elle une dilatation et par suite un mouvement ascendant de l'air. Par suite de cette aspiration l'air afflue de l'un et l'autre hémisphère vers l'équateur. Si la terre était immobile, il en résulterait un vent du nord dans l'hémisphère boréal, et un vent du sud dans l'hémisphère austral ; mais la terre tourne, et avec une vitesse qui va évidemment en diminuant à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur. Supposons, d'après cela, une masse d'air

transportée *tout à coup* à une plus petite distance de l'équateur; sa vitesse étant moindre que celle de la région où on l'amène, elle constituera comme une sorte d'obstacle en repos relatif par rapport à la terre, et comme celle-ci tourne de l'ouest à l'est, elle produira l'effet d'un vent d'est. Or, si on suppose que la masse d'air, au lieu d'être transportée tout à coup vers l'équateur, y arrive graduellement, la direction du vent produit par elle sera intermédiaire entre l'est et le nord, c'est-à-dire qu'il aura la direction du nord-est. Le même raisonnement montre que dans l'hémisphère austral l'alizé soufflera du sud-est.

Vers l'équateur se trouve la rencontre des deux alizés : c'est la région dite des *calmes*, expression qui signifie seulement qu'il n'y a pas de vent de direction régulière, et non point qu'il n'y a pas de vent, car c'est ordinairement dans ces parages que s'engendrent le plus aisément des bourrasques ou des tempêtes plus ou moins violentes.

A l'alizé inférieur correspond le contralizé supérieur, résultant de l'écoulement de l'air échauffé vers les pôles. Ce contralizé s'abaisse graduellement vers la terre et l'atteint vers le quarantième ou le cinquantième degré de latitude; il constitue un vent du sud-ouest qui est en effet le vent dominant dans le nord de l'Europe.

Ces mouvements de l'atmosphère ont une grande influence sur les mouvements de la mer. C'est ainsi, par exemple, qu'avant de pénétrer dans le golfe du Mexique où il prend plus particulièrement le nom de *gulf-stream*, ce célèbre courant se dirige vers l'équateur à peu près parallèlement au grand courant atmosphérique correspondant.

407. Moussons. — Les moussons sont des vents qui règnent surtout dans la mer des Indes, et qui sont subordonnés au mouvement du soleil. Pendant l'été, le soleil étant au-dessus de l'équateur, les plateaux du Thibet et de l'Himalaya s'échauffent considérablement, tandis qu'il se produit un refroidissement du côté de la Nouvelle-Hollande et de l'Afrique méridionale : il en résulte des brises diverses dont la résultante est un vent du sud-ouest qui règne en effet d'avril à octobre. Dans l'autre moitié de l'année souffle l'alizé du nord-est, qui porte le nom de mousson du nord-est.

ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE XXXV.

PREMIERS PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES.

408. Phénomènes fondamentaux. — Si l'on vient à frotter avec de la laine ou avec une peau de chat bien sèche un tube de verre, on reconnaît que celui-ci acquiert la propriété d'attirer les corps



Fig. 332. — Attraction des corps légers par un corps électrisé.

légers. En plaçant, en effet, en regard des parties frottées de petits morceaux de papier, des brins de paille, de la sciure de bois, etc., on voit ces différents corps se porter sur le tube de verre; quelques-uns y restent adhérents, d'autres sont repoussés pour être ultérieurement attirés de nouveau, d'où résultent des mouvements

divers d'autant plus prononcés en général que le tube est plus gros et qu'il a été frotté plus vivement.

Lorsqu'on place le tube à une petite distance du visage, on sent comme le contact d'une toile d'araignée. Si l'on en approche le doigt, il se produit un pétillement particulier, en même temps qu'une *étincelle* brillante jaillit entre le doigt et le tube. Le tube de verre a donc acquis par suite du frottement des propriétés curieuses et caractéristiques; on dit qu'il est *électrisé*, et on appelle *électricité* l'agent auquel on attribue les phénomènes qui viennent d'être décrits.

Le verre n'est pas la seule substance qui soit susceptible de s'électriser par le frottement; la résine, le soufre, les pierres précieuses, l'ambre jaune, etc., présentent la même propriété. C'est du nom grec de cette dernière substance, ἤλεκτρον, que dérive le mot électricité.

Tous les corps ne paraissent pas au premier abord susceptibles de s'électriser par le frottement; en effet, si, tenant à la main une tige de métal, on la frotte avec de la laine, on ne réussit pas à lui donner les propriétés d'un corps électrisé. Mais il ne faut pas se hâter d'en conclure que les métaux sont inaptes à acquérir ces propriétés, car, en ajustant la tige de métal à l'extrémité d'un tube



Fig. 333. — Électrisation d'un métal.

de verre (fig. 333), on l'électrise d'une façon très-sensible en la frappant avec une peau de chat ou une étoffe de laine. Il n'y a donc pas lieu d'admettre l'ancienne distinction des corps idio-électriques et anélectriques, c'est-à-dire des corps susceptibles ou non susceptibles de s'électriser, car tous les corps sans exception peuvent s'électriser. Mais il y a lieu d'établir entre eux une différence d'une autre nature, qui a été mise en évidence pour la première fois par le physicien anglais Grey, en 1729.

409. Corps conducteurs et corps non conducteurs. — Dans certains corps, tels que le verre, la résine, etc., l'électricité réside dans les points seulement où elle a été développée; dans d'autres,

au contraire, comme les métaux, l'électricité développée en un point se propage immédiatement et se manifeste sur tous les points de leur surface. Ainsi, dans l'expérience qui vient d'être citée, il suffit d'électriser la portion du métal voisine du verre pour que les signes de l'électricité se manifestent immédiatement à l'extrémité opposée. Les premiers corps, la résine, le verre, sont dits *mauvais conducteurs*. Les métaux sont appelés *bons conducteurs*. Un corps mauvais conducteur prend souvent le nom de *corps isolant*, et un corps bon conducteur supporté par un corps mauvais conducteur est dit *isolé*. Au point de vue de l'électricité, la justesse de ces expressions est évidente.

La conductibilité électrique n'est pas, du reste, une propriété absolue, il y a à cet égard des différences d'un corps à l'autre comme dans toutes les propriétés physiques. Il serait difficile d'exprimer par des nombres les rapports de conductibilité des différents corps, mais on peut assigner à peu près l'ordre dans lequel ils doivent être placés.

I. — CORPS CONDUCTEURS

PLACÉS DANS L'ORDRE DE LEUR POUVOIR CONDUCTEUR.

Tous les métaux.	Fluides animaux.	Chanvre.
Charbon calciné.	Eau de mer.	Animaux vivants.
Plombagine.	Eau de source.	Flamme.
Acides concentrés.	Eau de pluie.	Fumée.
Acides étendus.	Neige.	Vapeur.
Solutions salines.	Végétaux vivants.	Terres et pierres humides.
Minerais métalliques.	Lin.	

II. — CORPS ISOLANTS

PLACÉS DANS L'ORDRE DE LEUR FACULTÉ ISOLANTE.

Gomme laque.	Gemmes.	Porcelaine.
Ambre.	Soie.	Marbre.
Résines.	Cheveux.	Camphre.
Soufre.	Laine.	Caoutchouc.
Cire.	Plumes.	Craie.
Jais.	Papier sec	Chaux.
Verre.	Parchemin	Phosphore.
Mica.	Cuir.	Huiles.
Diamant.	Bois échauffé.	Oxydes métalliques.

Le corps humain est bon conducteur de l'électricité. Si en effet une personne se place sur un tabouret à pieds de verre et qu'on la frappe avec une peau de chat, elle s'électrise d'une manière très-sensible, et de tous les points de la surface du corps indistinctement on peut tirer des étincelles.

Lorsqu'un corps conducteur isolé et électrisé est mis en contact avec un autre conducteur isolé aussi, mais non électrisé, on remarque qu'après le contact les deux corps jouissent des propriétés électriques ; la vertu électrique s'est donc répartie entre les deux corps. Si le dernier corps est très-grand par rapport au premier, la vertu électrique de celui-ci s'affaiblit très-notablement et peut même devenir nulle. C'est ce qui arrive lorsqu'on met un corps électrisé en communication avec le sol, qui peut être considéré comme un ensemble conducteur; après la communication le corps a perdu toute vertu électrique. De là le nom de *réservoir commun* donné à la terre.

Il est aisé de comprendre d'après cela comment il se fait qu'on ne parvienne pas à électriser une tige de métal que l'on tient à la main : l'électricité, au fur et à mesure qu'elle se développe, disparaît par l'intermédiaire du corps dans le réservoir commun.

L'air doit être considéré comme un corps isolant, car l'électricité peut se maintenir pendant un temps plus ou moins long à la surface des corps conducteurs et isolés. Toutefois, lorsque l'air est humide, son pouvoir conducteur augmente très-notablement, les corps conducteurs et isolés perdent rapidement leur électricité et les expériences deviennent fort difficiles. Il faut remarquer d'ailleurs que, dans ces circonstances, de la vapeur d'eau se condense sur les pieds isolants des appareils et à la déperdition par l'air s'ajoute celle qui a lieu par les supports devenus humides et par suite conducteurs. C'est ce qui explique la nécessité de les essuyer soigneusement avec du papier ou du linge chaud, et même de placer au milieu des appareils un petit fourneau qui, échauffant l'air ambiant, en diminue l'état hygrométrique. En général, c'est par les belles et froides journées d'hiver que les expériences d'électricité se font avec le plus de facilité et de succès.

410. Hypothèses électriques. — Pour étudier d'un peu plus

près les premiers phénomènes électriques, on se sert d'un petit appareil appelé pendule électrique. Il se compose d'une balle en moelle de sureau, suspendue par un fil de soie à un support isolant. Lorsqu'on approche un tube de verre électrisé de la petite

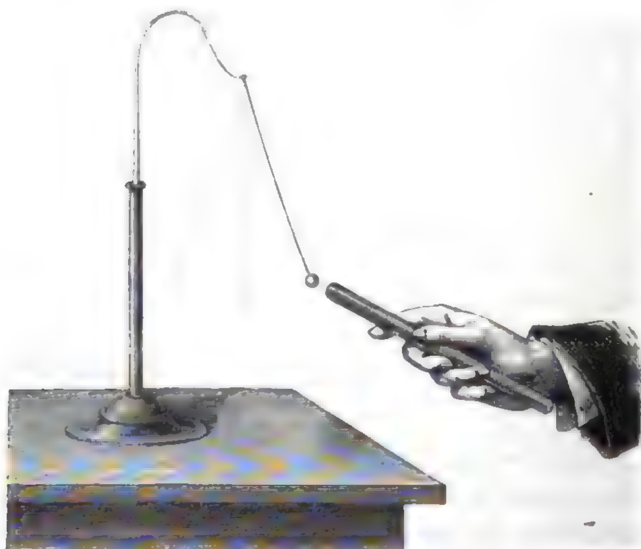


Fig. 334. — Pendule électrique.

balle isolée, cette dernière est attirée ; mais dès qu'elle a touché le tube de verre, à l'attraction succède immédiatement une répulsion qui se maintient tant que la boule conserve son électricité. La même expérience peut être faite avec un bâton de résine ou tout autre corps électrisé.

Si, au moment où le pendule électrique est repoussé par le verre, on approche la résine électrisée, celle-ci l'attire ; si inversement on approche du pendule électrique un tube de verre électrisé au moment de la répulsion produite par la résine, il y a également attraction. Ces phénomènes montrent clairement que l'électricité développée sur la résine n'est pas de même nature que celle développée sur le verre, qu'elles ont pour ainsi dire des propriétés opposées, puisque ce que l'un des corps attire l'autre le repousse. On appelle *électricité positive* celle que le verre poli acquiert quand on le frotte avec de la laine, et *électricité négative* celle que la résine ac-

quiert dans les mêmes circonstances. En répétant l'expérience avec différents corps, on reconnaît que les uns se conduisent comme le verre, les autres comme la résine. Les premiers sont électrisés positivement, les seconds négativement.

Les circonstances qui viennent d'être mentionnées servent de base à l'hypothèse suivante, dite hypothèse des deux fluides, et qui sert à expliquer d'une manière suffisamment satisfaisante les différents phénomènes électriques.

Il existe deux fluides appelés, l'un le fluide positif ou électricité positive, l'autre fluide négatif ou électricité négative. Les particules similaires de ces fluides se repoussent, et les particules de nom contraire s'attirent. La réunion de quantités égales de fluides de nom contraire forme du fluide neutre ou fluide naturel, que l'on suppose exister dans tous les corps en quantité inépuisable et qui ne produit aucun phénomène particulier. Sous diverses influences, parmi lesquelles il faut citer le frottement, le fluide neutre se décompose en ses deux éléments; le fluide positif passe dans le corps frottant, par exemple, et le fluide négatif dans le corps frotté. C'est aux attractions et aux répulsions mutuelles des fluides électriques que sont dus les mouvements divers que l'on observe dans les corps électrisés.

411. Conséquences de l'hypothèse des deux fluides. — On trouve une première confirmation des hypothèses précédentes lorsqu'on cherche la nature des électricités que possèdent deux corps qui ont été frottés l'un contre l'autre. On remarque en effet, et cette règle est sans exception, que les deux corps sont électrisés d'une manière différente, c'est-à-dire que si on les met en présence d'un pendule préalablement électrisé, l'un des corps attire le pendule, tandis que l'autre le repousse. On peut donner à cette expérience une forme assez curieuse. Deux personnes étant placées sur des tabourets à pieds de verre, l'une d'elles frappe l'autre avec une peau de chat; après cette opération les deux personnes sont électrisées : celle qui tenait la peau de chat est électrisée négativement, et l'autre positivement; de chacune d'elles on peut, en approchant le doigt, tirer des étincelles.

La nature particulière de l'électricité que prend un corps par le frottement dépend évidemment de la nature de sa surface. Que

l'on prenne, par exemple, deux disques, l'un en verre, l'autre en métal, soutenus chacun en leur centre par un manche bien isolant et qu'on les frotte vivement l'un contre l'autre, on verra que le métal est électrisé négativement et le verre positivement; mais si l'on recouvre le métal d'une peau de chat et qu'on répète l'expérience, le verre cette fois s'électrisera positivement. En général, l'électricité négative se porte sur le corps dont la température s'élève le plus pendant le frottement. Dans la liste suivante les corps sont rangés dans un ordre tel, que chacun d'eux s'électrise positivement avec ceux qui le précèdent et négativement avec ceux qui le suivent.

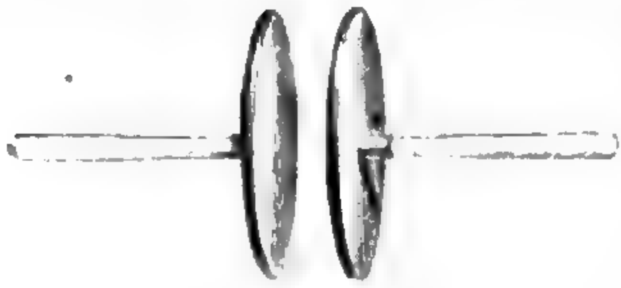


Fig. 335.

Peau de chat.	Plumes.	Soie.
Verre poli.	Bois.	Gomme laque.
Étoffe de laine.	Papier.	Verre dépoli.

CHAPITRE XXXVI.

ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE.

412. Électrisation par influence. — Nous avons dans ce qui précède constaté deux moyens d'électrisation : la communication directe avec un corps électrisé et le frottement; mais ce ne sont pas les seuls, à beaucoup près, et on peut dire, en général, que toutes les fois que d'une manière quelconque l'équilibre moléculaire d'un corps se trouve détruit, il y a décomposition du fluide neutre et par suite électrisation. Il suffit d'ailleurs, pour que cette rupture d'équilibre ait lieu, de la présence d'un corps électrisé. Ainsi, qu'on approche de la machine électrique un corps quelconque conducteur et isolé, dès que la distance sera suffisamment petite, il donnera des signes d'électricité, et de chacun des points de la surface on pourra tirer des étincelles. On dit dans ce cas qu'il y a électrisation par influence ou par induction.

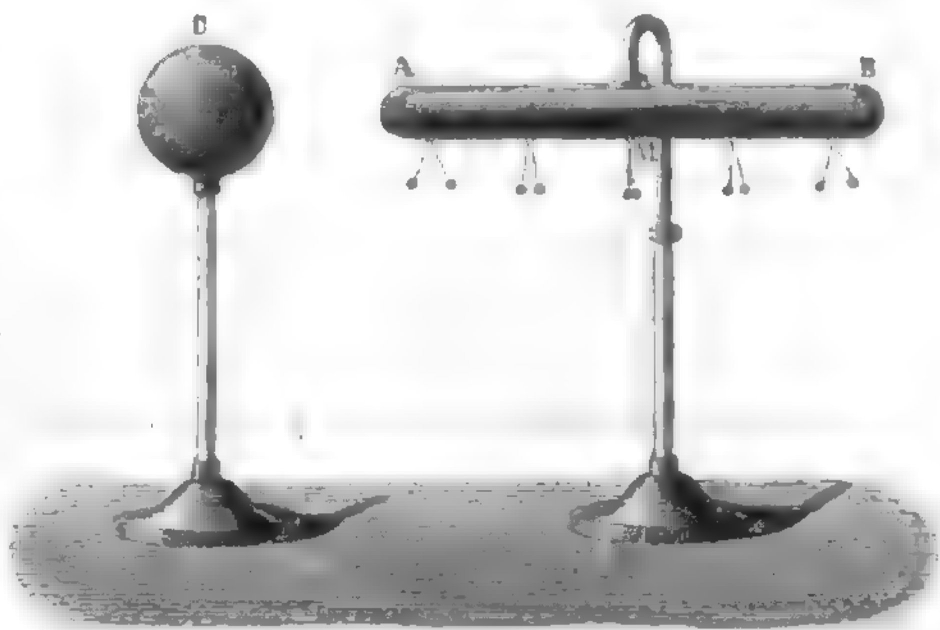


Fig. 336. — Électrisation par influence.

On peut analyser facilement ces phénomènes à l'aide de la disposition d'expérience indiquée par la figure 336. C'est une sphère conductrice électrisée positivement, par exemple; en présence de cette sphère on place un cylindre conduc-

teur et isolé AB sur lequel sont suspendus à diverses distances des doubles pendules conducteurs à balles de sureau. Lorsqu'on approche le cylindre de la sphère, on voit les balles s'écarter, on remarque en outre que la divergence des petits pendules est la plus grande possible aux extrémités et va en décroissant des extrémités vers le milieu où se trouve une ligne M sur laquelle elle est nulle. Cette ligne neutre n'est pas précisément au milieu du cylindre, elle est plus rapprochée de l'extrémité A que de l'extrémité opposée; de plus, l'électrisation est plus forte en A qu'en B.

Il est facile de s'assurer que les deux moitiés du cylindre sont électrisées d'une manière contraire; l'extrémité A est électrisée négativement et l'extrémité B positivement. Il suffit d'approcher graduellement un bâton de résine électrisé du pendule situé en A, on voit qu'il y a répulsion, tandis qu'au contraire on constate une attraction en B.

On explique très-simplement ces différents phénomènes dans l'hypothèse des deux fluides. En effet, l'électricité positive de C décompose à distance l'électricité naturelle du corps AB, attire le fluide de nom contraire dans la partie la plus voisine et repousse le fluide de même nom. Ces deux fluides se trouvent donc sur deux régions opposées du cylindre, séparées par une ligne neutre ; mais comme l'attraction se fait à une distance plus petite, et par suite avec une plus grande intensité que la répulsion, la ligne neutre se trouve plus rapprochée de l'extrémité voisine de C que de l'extrémité opposée.

Si l'on approche le cylindre de la sphère inductrice, la divergence des pendules augmente; elle diminue si on l'éloigne; enfin tout signe d'électricité disparaît si on enlève la sphère, ou si on la met en communication avec le sol : dans ce cas, les deux fluides séparés par l'induction se recomposent pour former du fluide naturel.

Si, pendant que le cylindre AB est soumis à l'influence, on vient à le mettre en communication avec le sol par la partie B, on voit immédiatement les pendules situés dans cette région retomber dans la verticale, tandis qu'il se produit en A un accroissement de divergence. On peut expliquer très-simplement ces particula-

rités; en effet, la communication avec le sol fait disparaître le fluide repoussé; mais par cela même l'action inductrice de la sphère, qui se trouvait équilibrée par l'attraction réciproque des fluides séparés, peut se manifester de nouveau; il y a donc une nouvelle décomposition de fluide neutre, et par suite un accroissement d'électricité en A. Le fluide négatif se trouve d'ailleurs seul sur le cylindre; la ligne neutre est rejetée au delà des limites du corps; et si, après avoir supprimé la communication avec le sol, on enlève la sphère inductrice, le cylindre est électrisé négativement, comme s'il avait été frotté ou mis en contact avec un corps électrisé.

Il est très-important de remarquer que ce résultat est le même quel que soit le point du cylindre par lequel on établit la communication avec le sol; c'est toujours le fluide repoussé qui disparaît, le corps ne possède plus que l'espèce d'électricité contraire à celle du corps influent; toutefois il peut se présenter, suivant le mode de communication avec le réservoir commun, quelques petites variations dans le détail de la distribution de l'électricité, sans que le sens du phénomène soit changé.

Quand on met en présence d'un corps électrisé, non plus un

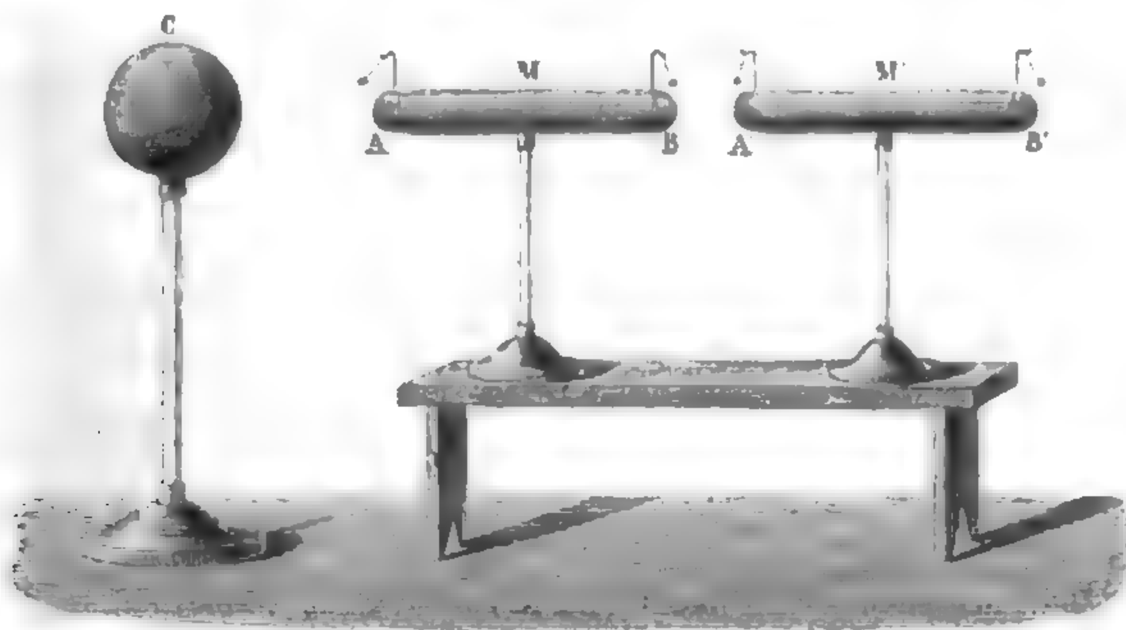


Fig. 337. — Induction successive.

seul conducteur, mais une série de conducteurs AB, A'B', etc., sur chacun d'eux il se produit une distribution d'électricité analogue, mais d'intensité décroissante; dans le cylindre A'B', par exemple, se trouve de l'électricité négative en A' et de l'électricité positive en B'; de plus, l'électrisation est plus forte que celle qui se produirait par la seule action de la sphère si on enlevait le cylindre AB.

Cette observation prouve que l'extrémité de chacun des conducteurs agit sur le suivant, comme la sphère agit sur le conducteur AB.

Les diverses molécules d'un corps peuvent être considérées en réalité comme des conducteurs placés en présence les uns des autres, de sorte que sous l'action d'un corps électrisé elles doivent se constituer dans un état électrique opposé sur leurs deux moitiés, dans une sorte de polarité électrique. Cet état polaire ne persiste pas et ne saurait être constaté dans les corps bons conducteurs, mais il en est tout autrement dans les corps mauvais conducteurs; nous verrons même plus loin que cette polarité paraît être une condition nécessaire de l'électrisation par influence.

413. Attractions et répulsions électriques. — Les phénomènes primitifs d'attraction et de répulsion manifestés par les corps électrisés dépendent du développement de l'électricité par influence.

Supposons, par exemple, qu'on approche un corps électrisé positivement C d'un pendule électrique isolé et à l'état naturel; le fluide neutre de la petite balle est décomposé, les fluides se disposent sur elle suivant les règles de la décomposition par influence, le fluide négatif étant accumulé surtout en *a* et le fluide positif en *b*; on a donc une force attractive entre les fluides de nom contraire et une force répulsive entre les fluides de même nom; mais cette dernière, agissant à une distance plus grande sera moindre que la première, la force attractive sera donc prédominante, et par suite la petite balle sera attirée. Il faut remarquer que c'est entre les fluides électriques et non point entre les corps qu'ont lieu les actions attractives ou répulsives; mais les fluides sont en raison du pouvoir isolant de l'air ou de sa pression, ou du défaut de conductibilité des corps, retenus à la surface de ces derniers avec une force plus ou moins considérable, et, par suite, ils entraînent dans leur mouvement les corps sur lesquels ils se trouvent, pourvu que ceux-ci aient une masse suffisamment petite. Si la petite balle du pendule communique avec le sol, le fluide repoussé disparaissant dans le réservoir commun, l'attrac-

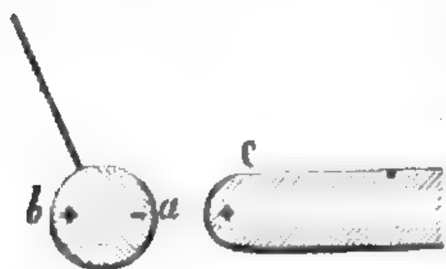


Fig. 338. — Attractions électriques.

tion sera plus marquée, puisqu'elle ne sera combattue par aucune force répulsive.

Si le pendule électrique était préalablement électrisé, il y aurait attraction ou répulsion, suivant la nature de l'électrisation; mais dans tous les cas, et indépendamment de cette action, il se produit toujours une décomposition par influence, qui a pour résultat constant une attraction. Il suit de là que lorsque le corps agissant est fortement électrisé, et qu'on l'approche brusquement à une petite distance, il y aura toujours attraction. C'est une observation qu'il importe d'avoir présente à l'esprit quand on veut étudier la nature de l'électricité d'un corps en se servant du pendule électrique ou des électroscopes; il convient d'approcher le corps électrisé de loin et graduellement, de manière à saisir le sens du *premier* mouvement produit.

414. Étincelle. — C'est encore un phénomène d'influence qui a lieu en réalité lors de l'électrisation d'un corps conducteur et isolé par son contact avec un corps déjà électrisé. En effet, quand les corps s'approchent l'un de l'autre, il y a décomposition du fluide neutre dans celui des deux qui est à l'état naturel; au moment du contact, le fluide attiré se combine avec une portion correspondante de celui que renferme le corps électrisé, la neutralise, et les choses se passent par conséquent comme s'il y avait eu passage de l'électricité d'un des corps sur l'autre.

Ordinairement, avant que le contact ait lieu, il se produit une étincelle entre les deux corps, et l'on reconnaît d'ailleurs que le partage de l'électricité est le résultat même de cette étincelle, comme il le serait du contact. De cette observation il résulte que l'étincelle n'est autre chose que la combinaison à travers l'air des deux fluides de nom contraire, dont l'attraction mutuelle a surmonté la résistance qui s'opposait à leur réunion.

L'étincelle électrique est sans contredit le phénomène le plus curieux que présentent les corps électrisés : elle excita chez les premiers savants qui l'observèrent (Grey, Dufay) une admiration presque mêlée d'effroi; aujourd'hui encore, près d'un siècle après l'invention de la machine électrique, on ne se lasse pas de suivre avec une vive curiosité les diverses expériences que l'on peut faire

avec cet appareil. Nous décrirons les diverses machines électriques dans l'un des chapitres suivants, et nous ferons connaître à cette occasion les propriétés caractéristiques de l'étincelle.

415. Électroscopes. — Les électroscopes sont des appareils destinés à constater la presence de l'électricité et à en déterminer l'espèce. Le pendule électrique isolé constitue un véritable électroscope. Si, en effet, on approche un corps de la petite boule et qu'il y ait attraction, c'est que le corps est électrisé. Pour savoir de quelle manière, on laisse venir la petite boule au contact, elle est alors repoussée; pendant que cette répulsion a lieu, on approche un tube de verre électrisé : s'il y a attraction, c'est que la boule est électrisée négativement; il en est par conséquent de même du corps. Ce serait le contraire s'il y avait répulsion. La petite boule du pendule électrique étant placée dans l'air, la déperdition est souvent assez rapide, et l'expérience que nous venons de décrire devient fort incertaine; les électroscopes proprement dits sont d'un emploi plus sûr.

L'électroscope à feuilles d'or, que nous prendrons pour exemple, se compose d'une cloche de verre (fig. 339) reposant sur un plateau métallique. A sa partie supérieure se trouve une ouverture que traverse une tige métallique, terminée en boule à l'extérieur et supportant à l'intérieur deux petites lames d'or. La tige métallique est parfaitement isolée à l'aide d'un tube de verre et de cire à cacheter, qui la séparent des parois de l'ouverture; souvent même, la portion supérieure de la cloche est enduite d'un vernis isolant. On pourrait substituer aux deux feuilles d'or deux pailles ou deux fils de lin supportant chacun une petite boule en moelle de sureau; on aurait ainsi l'*électroscope à pailles*, l'*électroscope à balles de sureau*, qui ne diffèrent pas véritablement de celui qui vient d'être décrit.

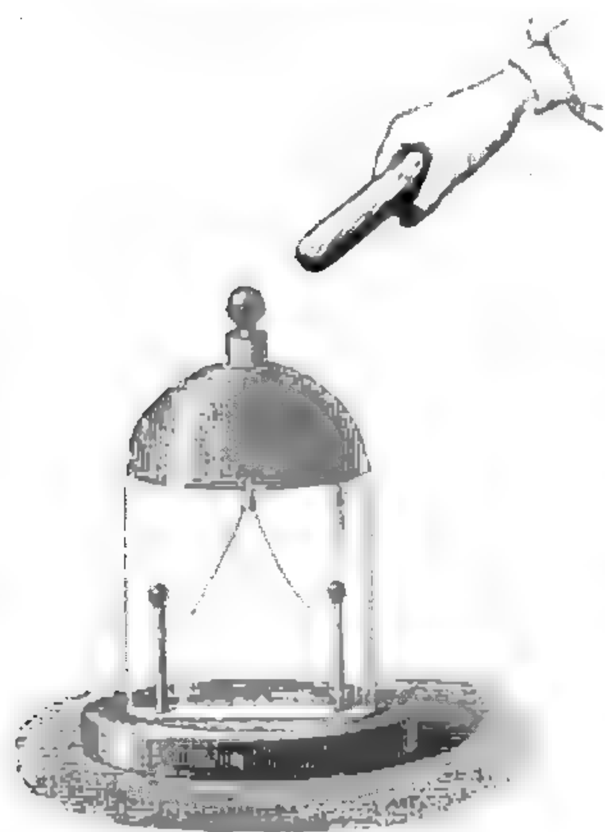


Fig. 339. — Électroscope à feuilles d'or.

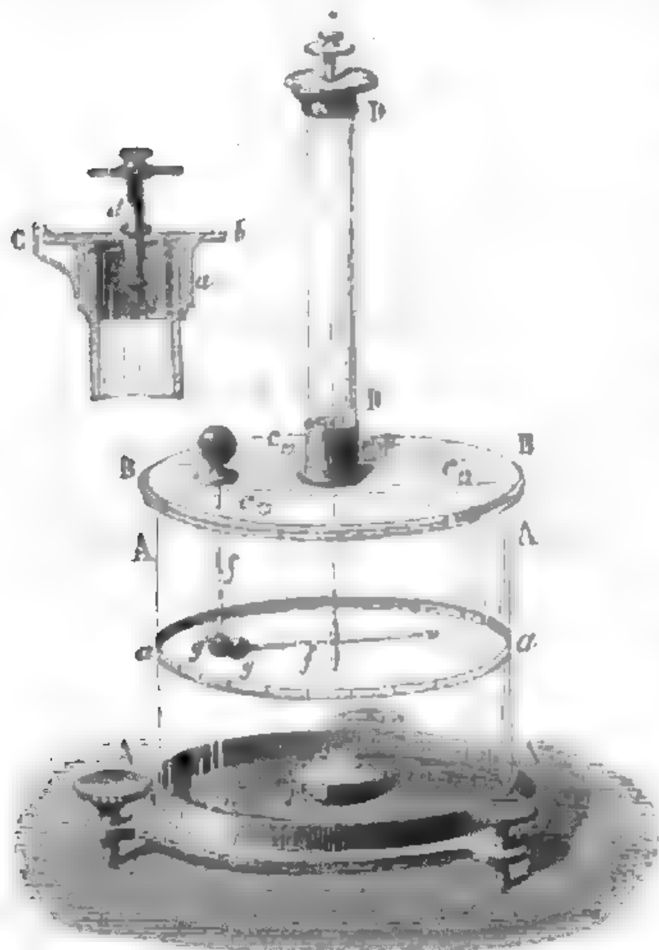
Pour reconnaître si un corps est électrisé, on l'approche de la boule de l'électroscope ; le fluide naturel de la tige est décomposé, le fluide de nom contraire à celui du corps est attiré sur la boule, celui de même nom est repoussé dans les pailles et les fait diverger. Quant à la nature de l'électricité du corps, on la reconnaît aisément de la manière suivante : Pendant que les pailles divergent, sous l'influence du corps, on touche la boule avec le doigt, l'électricité repoussée disparaît dans le sol, et l'électroscope ne retient plus que l'électricité de nom contraire à celle du corps ; on enlève ce dernier et l'électricité attirée, se répandant dans les pailles, les fait diverger. Qu'on approche alors graduellement un corps électrisé d'une manière connue, par exemple un tube de verre, si la divergence augmente, c'est que les pailles sont électrisées positivement, par suite que le corps l'est négativement ; si au contraire la divergence diminue, c'est que l'électricité des pailles est négative, et par conséquent celle du corps est positive.

L'électroscope à feuilles d'or étant d'une grande sensibilité, on doit approcher les corps électrisés graduellement et avec précaution, afin d'éviter la cause d'erreur signalée au paragraphe 412 ; on prévient ainsi d'ailleurs les mouvements brusques des feuilles qui pourraient en amener la rupture. Il pourrait arriver aussi que les feuilles trop écartées vinssent s'appliquer sur les parois de la cloche, d'où on ne pourrait les détacher qu'en s'exposant à les déchirer ; pour éviter cet inconvénient, on a placé deux petites colonnes métalliques, communiquant avec le sol ; si les feuilles s'écartent un peu trop, elles viennent toucher les colonnes et retombent à l'état naturel.

CHAPITRE XXXVII.

MESURE DES FORCES ÉLECTRIQUES.

416. Balance de Coulomb. — Coulomb, a qui sont dus principalement les travaux qui ont fondé la théorie physique de l'électricité, s'est servi dans ses recherches d'un appareil important à connaître et auquel les physiciens doivent encore avoir recours toutes les fois qu'il s'agit de mesurer l'intensité des forces électriques. Cet appareil, fondé sur les lois de l'élasticité de torsion, à reçu de son auteur le nom de *balance de torsion*. Nous allons le décrire et nous ferons connaître ensuite quelques-unes des applications qui en ont été faites par Coulomb.


Fig. 340. — Balance de Coulomb.

Il se compose d'une cage en verre parallélipipédique ou cylindrique AA (fig. 340) dont le couvercle supérieur B est surmonté d'un cylindre vertical DD beaucoup plus étroit; ce dernier se termine supérieurement par une virole cylindrique *a* portant un point de repère *c*. Une seconde virole *b* peut tourner sur la première et porte sur sa surface supérieure un cadran divisé en 360 parties égales. Au centre de la virole *b* se trouve une ouverture dans laquelle s'engage à frottement doux un petit cylindre en métal *d* qui se termine infé-

rieurement par une pince. De cette disposition il résulte qu'en faisant tourner la virole *b* on entraîne dans son mouvement le cylindre central; mais celui-ci peut recevoir un mouvement propre et indépendant de celui de la virole. L'ensemble de ces diverses pièces constitue ce que l'on appelle le *micromètre*. Un fil métallique très-fin, fixé à la pince par son extrémité supérieure, supporte inférieurement une petite masse métallique traversée par une aiguille très-fine *f* en gomme laque, portant à l'une de ses extrémités une petite boule conductrice *g*. Dans le plan horizontal qui contient l'aiguille se trouvent tracées sur la surface du cylindre des divisions angulaires de la circonférence. Enfin, vis-à-vis la division 0 se trouve une boule conductrice fixe *g'*, maintenue par une tige en gomme laque *f'*, qui traverse une ouverture située sur le couvercle de la caisse.

417. Loi des répulsions électriques. — Pour montrer la manière d'employer l'appareil aux recherches électrométriques, nous expliquerons la méthode suivie par Coulomb pour trouver comment varient avec la distance les attractions et les répulsions des corps électrisés, et particulièrement les répulsions.

Le point de repère de la virole supérieure étant au 0, on amène, en tournant la partie centrale du micromètre, la boule mobile au contact de la boule fixe sans aucune torsion du fil. On enlève alors la boule fixe, on la met en communication avec un corps électrisé et on la reporte dans la balance; son électricité se communiquant à la boule mobile, celle-ci est repoussée à une distance angulaire que l'on apprécie à l'aide de la division angulaire de la cage. Dans cette position, il y a équilibre entre la force de torsion qui tend à ramener l'aiguille à sa position initiale et la force répulsive. On tourne alors le micromètre supérieur, en sens contraire de la répulsion, de manière à augmenter la torsion, l'aiguille mobile se rapproche de sa position d'équilibre et se fixe à une distance angulaire plus petite. En continuant à tordre le fil on peut obtenir ainsi diverses positions d'équilibre dans lesquelles les forces répulsives sont équilibrées par les forces de torsion. Mais ces dernières sont, d'après les lois connues de l'élasticité, proportionnelles aux angles de torsion; il suffira donc, pour découvrir la loi dont il s'agit, de comparer les angles totaux de torsion aux distances des

boules. C'est ainsi que Coulomb trouva que les forces répulsives des corps électrisés varient *en raison inverse du carré de la distance.*

Voici en effet les nombres obtenus dans l'une des expériences. L'écart primitif de la boule mobile étant de 36°, pour ramener cette distance à n'être que de 18°, il fallut tourner le micromètre de 126°, et pour l'amener à 8°,5, il fallut une nouvelle rotation de 441°. On voit donc qu'aux distances 36°, 18°, 8°,5, qui sont entre elles sensiblement comme 1, 1/2 et 1/4, les forces répulsives sont équilibrées par les forces de torsion 36; $126 + 18 = 144$; $441 + 126 + 8,5 = 575,5$; or $144 = 4 \times 36$, $576 = 16 \times 36$, c'est-à-dire qu'à des distances 2, 4 fois plus petites, les forces répulsives deviennent 4, 16 fois plus grandes, ce qui est précisément la loi énoncée.

418. Équation d'équilibre de la balance. — Il faut remarquer toutefois que dans l'interprétation précédente de l'expérience de Coulomb on commet deux erreurs. 1° On évalue la distance des deux boules à l'aide de l'arc qui les sépare, tandis que cette distance est mesurée par la corde. 2° On admet que la force répulsive est égale à la force de torsion, ce qui n'est pas exact, puisque les deux forces n'ont pas la même direction, la première étant dirigée suivant la corde de l'arc qui sépare les deux boules et la seconde suivant la tangente. Il convient donc, pour savoir dans quelle mesure les nombres trouvés par Coulomb vérifient la loi, d'éliminer toute supposition erronée, et d'établir exactement les conditions d'équilibre de l'aiguille mobile.

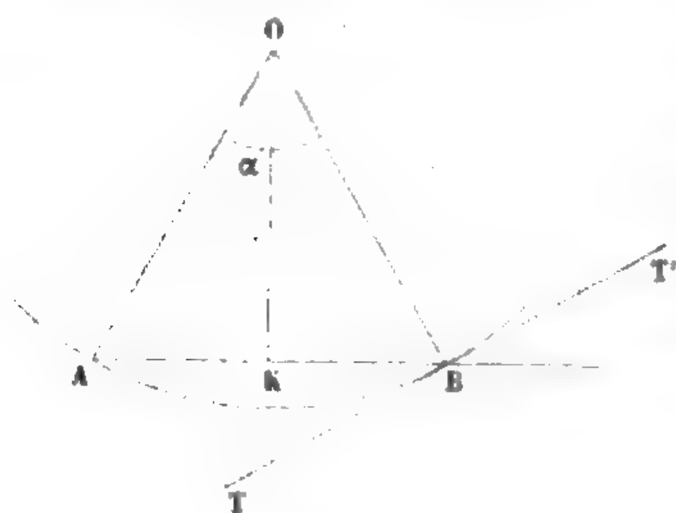


Fig. 341.

Considérons, à cet effet, le cercle décrit par l'aiguille mobile; soit $AOB = \alpha$ (fig. 341) l'écart initial des boules, la distance AB des deux boules est exprimée, en appelant l le rayon OA, par $2l \sin \frac{1}{2}\alpha$. Si la loi qu'il s'agit de démontrer est vraie, la force répulsive f à l'unité de distance devient, à la distance AB, $\frac{f}{AB^3}$ ou $\frac{f}{4l^2 \sin^2 \frac{1}{2}\alpha}$, et c'est

seulement la composante de cette force suivant la tangente, c'est-à-dire $\frac{f \cos \frac{1}{2}\alpha}{4l^2 \sin^2 \frac{1}{2}\alpha}$, qui fait équilibre à la force de torsion. Or cette dernière est proportionnelle à l'angle total de torsion A, elle est mesurée par nA si on appelle n la force de torsion à l'extrémité de l'aiguille mobile pour un angle de torsion égal à 1°. On a donc pour l'équation d'équilibre

$$n\,A = \frac{f \cos \frac{1}{2}\alpha}{4\,l^2 \sin^2 \frac{1}{2}\alpha}$$

ou

$$\frac{f}{4\,n\,l^2} = A \sin \frac{1}{2}\alpha \operatorname{tang} \frac{1}{2}\alpha.$$

Or, le premier membre de cette égalité étant constant, il doit en être de même du second si la loi qu'il s'agit de vérifier est exacte. C'est ce qui résulte du tableau suivant :

	α	A	$A \sin \frac{1}{2}\alpha \operatorname{tang} \frac{1}{2}\alpha$
1re expérience.	36	36	3,614
2e expérience.	18	144	3,568
3e expérience.	8,5	575,5	3,169
La même en supposant. . .	9	576	3,557

On voit que la différence entre le premier et le deuxième nombre de la troisième colonne est insignifiant. Quant à la différence entre le second et le troisième, elle est un peu plus forte sans doute, mais elle ne correspond en définitive qu'à une erreur de 1/2 degré dans l'observation de l'arc.

419. Cas des attractions. — Pour déterminer la loi des attractions, on peut opérer d'une manière analogue. Après avoir mis le micromètre au 0, on tourne la pièce centrale de façon à placer la boule mobile à une certaine distance angulaire de la boule fixe, puis on communique aux deux boules des électricités différentes. Il se produit une attraction combattue par la torsion du fil, et, en faisant varier cette dernière, on pourra obtenir diverses positions d'équilibre. En comparant les distances diverses aux torsions cor-

respondantes, on reconnaîtra que la loi est la même que pour les répulsions. Toutefois les expériences présentent de très-grandes difficultés, et ne sont même possibles que lorsque les boules sont très-faiblement électrisées. En effet, la force attractive peut être, en réalité, aussi grande qu'on le voudra, puisqu'elle ne dépend que de l'intensité de l'électrisation, tandis que la réaction de torsion ne peut dépasser une certaine limite, qui dépend évidemment de la distance initiale. Il pourra donc arriver que les deux boules se précipitent l'une sur l'autre et qu'ainsi l'expérience ne puisse être continuée. Coulomb, pour empêcher cette circonstance de se produire, tendait dans la balance un fil de soie destiné à arrêter la boule mobile.

420. Loi des charges électriques. — Les attractions et répulsions électriques dépendent évidemment de l'intensité même de l'électrisation ou de ce que l'on peut appeler la charge électrique. Supposons que, par l'action de la force répulsive, les deux boules soient maintenues à une distance angulaire déterminée et que la force totale de torsion soit A. On touche la boule fixe avec une boule exactement égale et isolée; on doit admettre comme évident que l'électricité se partagera également entre les deux boules, de sorte qu'après le contact la boule fixe ne contiendra que la moitié de son électricité. Les deux boules se rapprochent, mais en diminuant la torsion à l'aide du micromètre, on peut ramener la distance à sa valeur initiale. Or on reconnaît que la torsion totale est réduite à sa moitié. Si on touche une seconde fois dans les mêmes conditions, il faudra, pour maintenir la même distance, réduire encore la torsion à la moitié, c'est-à-dire au quart de sa valeur primitive. Les mêmes circonstances se reproduiraient si, au lieu de toucher la boule fixe, on touchait la boule mobile, de sorte que si la charge de l'une des boules vient à varier dans un certain rapport, la force attractive ou répulsive varie dans le même rapport. On conclut de là que *les attractions et les répulsions sont proportionnelles aux charges électriques.*

421. Distribution de l'électricité à la surface des corps. — L'électricité se porte exclusivement à la surface des corps conducteurs. Ce fait résulte implicitement de l'observation faite fréquem-

ment par Coulomb, qu'une sphère creuse se charge de la même quantité d'électricité qu'une sphère pleine. On peut d'ailleurs le démontrer directement par l'expérience suivante indiquée par Biot :

On prend une sphère métallique isolée et électrisée et on l'enveloppe de deux hémisphères tenus par des manches isolants qui la recouvrent exactement (fig. 342). Lorsqu'on enlève rapide-

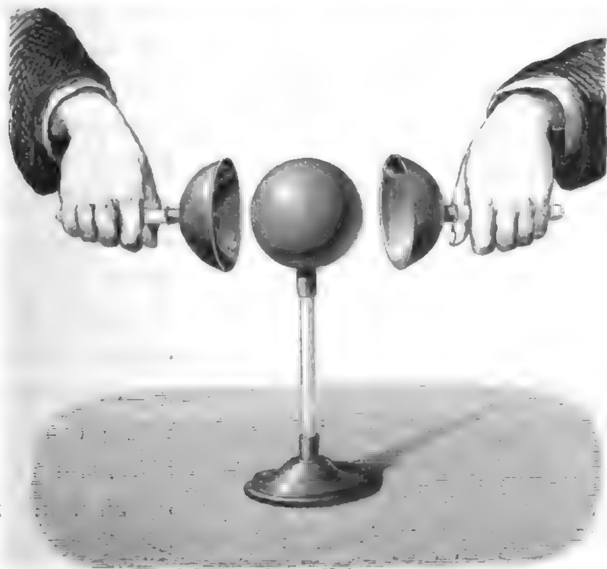


Fig. 342. — Expérience de Biot.

ment et en même temps les deux hémisphères, on constate, en les approchant d'un pendule électrique, qu'ils sont électrisés, tandis que la sphère ne présente pas d'électrisation sensible. Il faut remarquer toutefois qu'il est rare que cette expérience soit bien décisive, et le plus souvent la sphère se trouve électrisée d'une façon très-appréciable. C'est que, malgré la rapidité avec laquelle on retire les enveloppes hémisphériques, il est bien difficile qu'il n'y ait pas un moment où la sphère se trouve en contact avec elles par quelque point, le contact ayant cessé ailleurs ; on a alors un système de forme particulière dont la sphère fait partie et sur la surface duquel l'électricité se distribue. L'expérience suivante est beaucoup plus sûre.

On électrise une sphère métallique creuse, isolée, et présen-

tant un orifice à sa partie supérieure (fig. 343), puis on vient toucher sa surface intérieure avec un petit disque de papier doré, soutenu par une fine aiguille en gomme laque, c'est-à-dire avec ce qu'on appelle un *plan d'épreuve*. Celui-ci ne prend aucune électricité et demeure tout à fait sans action sur le pendule électrique ou sur un électroscope. Mais, au contraire, en appliquant le plan d'épreuve sur un point quelconque de la surface extérieure, on le trouve électrisé après ce contact et capable d'attirer les corps légers. Faraday faisait la même expérience en se servant d'un cylindre en treillis métallique, reposant sur un disque de métal isolé. Il électrisait le disque et ne réussissait jamais à recueillir la moindre trace d'électricité en touchant avec le plan d'épreuve la surface intérieure de l'appareil.



Fig. 343.

C'est aussi à Faraday qu'est due l'expérience suivante : Sur le contour d'un anneau métallique (fig. 344), supporté par un pied isolant, on fixe une sorte de sac conique, fait d'un mince tissu de lin, substance conductrice de l'électricité; un double fil de soie, fixé au sommet du cône, permet de le retourner de façon que la surface intérieure devienne la surface extérieure et *vice versa*. Quand on électrise cet appareil, on trouve toujours et exclusivement, avec le plan d'épreuve, de l'électricité sur la surface extérieure. Il faut donc admettre que lors du retournement le fluide électrique passe d'une face à l'autre du tissu.

On doit donc se représenter l'électricité d'un corps comme

formant une couche limitée à l'extérieur par la surface même du corps et à l'intérieur par une autre surface qui en est éloignée d'une très-petite quantité. Rien ne fait supposer *à priori* que cette



Fig. 344. — Expérience de Faraday.

couche doive être régulière, il est au contraire naturel d'admettre que, sauf le cas de la sphère, cette régularité ne se rencontrera pas, et que les différents points de la surface auront une électrisation, une charge différente, subordonnée à leur position particulière. A une charge, ou, comme on le dit encore, à une tension plus grande, correspond certainement une plus grande quantité d'électricité; mais on peut d'ailleurs faire à cet égard l'une des deux suppositions suivantes : ou bien, l'épaisseur de la couche électrique étant partout la même, la densité est plus forte là où la tension est plus forte; ou bien, la densité étant la même, la tension dépend de l'épaisseur. Il n'y a pas d'intérêt réel à se faire une opinion sur ce point particulier de l'hypothèse générale des deux fluides, mais il est au contraire très-intéressant de pouvoir se rendre compte de l'influence de la forme du corps sur la répartition de la charge électrique à la surface. Coulomb a employé très-heureusement sa balance à la résolution de cette importante question, et il est arrivé à quelques résultats qu'il est bon de connaître.

1° *Sphère* (fig. 345). — La charge électrique est la même sur tous les points de la surface.

2° *Ellipsoïde allongé* (fig. 346). — La charge est maxima à l'extrémité du grand axe et minima à l'extrémité du petit; de plus,

le rapport entre ces deux charges est d'autant plus grand que l'ellipsoïde est plus allongé.

3° *Disque plat* (fig. 347). — La charge électrique, presque nulle



Fig. 345. — Disposition de l'électricité à la surface d'une sphère.

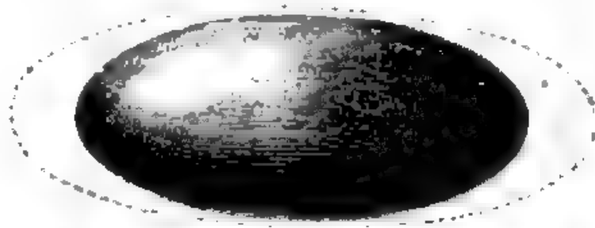


Fig. 346. — Disposition de l'électricité à la surface d'un ellipsoïde.

au centre et jusque près des bords, s'accroît très-vite sur les bords eux-mêmes, où elle est maxima.

4° *Cylindre terminé par des hémisphères* (fig. 348.) — Charge minima et très-faible au milieu, maxima à l'extrémité. Cette dernière tend d'ailleurs à devenir d'autant plus grande que le rayon du cylindre est plus petit par rapport à sa longueur.



Fig. 347. — Disposition de l'électricité sur un disque.

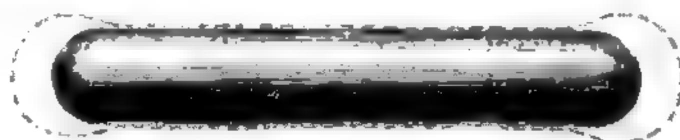


Fig. 348. — Disposition de l'électricité sur un cylindre terminé par des hémisphères.

5° *Sphères en contact.* — Dans les cas de sphères égales, la charge, nulle au point de contact et très-faible jusqu'à 30° de ce point, croît très-rapidement de 30 à 60°, moins rapidement de 60 à 90°, et d'une manière insensible de 90 à 180°. Quand les sphères sont inégales, la charge, en un point quelconque de la petite sphère, est plus forte que dans le point semblable de la grande ; lorsque l'une des sphères devient de plus en plus petite, le rapport des charges aux extrémités de la ligne des centres tend à devenir égal à 2.

422. Méthode d'expérience. — Les résultats précédents ont été obtenus par Coulomb de la manière suivante : Il appliquait le plan d'épreuve sur un des points du corps électrisé et le portait ensuite à la place de la boule fixe dans la balance de torsion, la boule mobile ayant préalablement reçu de l'électricité de même nature. Il se produisait une répulsion, et il mesurait, à l'aide du micromètre, la torsion nécessaire pour maintenir les deux boules à une distance déterminée. Il répétait ensuite l'expérience pour

un autre point, et le rapport des torsions nécessaires pour maintenir les boules à la même distance donnait le rapport des charges aux points considérés. On peut admettre, en effet, que le plan d'épreuve placé sur le corps y tient exactement la place d'un élément de surface, et que, lorsqu'on l'enlève, il emporte précisément la totalité de l'électricité qui résidait au point correspondant. Dans son action sur la boule mobile, il donnera par conséquent lieu à une répulsion qui sera la mesure de la charge du point touché.

Coulomb a même démontré, par une expérience directe, la légitimité de cette conclusion. Une sphère isolée ayant été électrisée, il mesura, par le procédé précédent, la charge électrique en un de ses points. Il toucha ensuite la sphère avec une sphère exactement pareille, ce qui doit avoir nécessairement pour résultat de diminuer en chacun des points la charge de moitié; or c'est précisément l'indication que donne le plan d'épreuve.

423. Contacts alternatifs. — Les expériences précédentes demandent naturellement un certain temps, pendant lequel l'électricité se dissipe plus ou moins rapidement; il en résulte que les charges accusées par la balance ne sont point une représentation fidèle de l'état électrique du corps à un moment donné. Coulomb éludait cette cause d'erreur par la méthode des contacts alternatifs. Après avoir touché successivement deux points et mesuré leur charge électrique, au bout d'un temps égal à celui qui sépare les deux expériences, il revenait toucher le premier point, et mesurait sa charge qui, à raison de la déperdition, se trouve plus faible que lors de la première expérience. En désignant par A et A' les deux charges observées et par B celle du second point, on voit que les quantités $\frac{A}{B}$ et $\frac{A'}{B}$ sont l'une plus forte, l'autre plus faible que le rapport cherché; on pourra donc, sans erreur notable, prendre pour la vraie valeur de ce rapport la moyenne $\frac{1}{2}\left(\frac{A}{B}+\frac{A'}{B}\right)=\frac{1}{2}\ \frac{A+A'}{B}$.

424. Pouvoir des pointes. — Une *pointe* peut être considérée soit comme l'extrémité d'un cylindre dont le rayon est très-petit,

soit comme l'extrémité d'une série de sphères dont les rayons vont en diminuant; dans les deux cas, on voit que la charge électrique y est très-considérable. Il est donc naturel de penser que la résistance de l'air sera vaincue en général, et que l'électricité s'écoulera; c'est en cela que consiste le pouvoir des pointes. On remarque, en effet, que toutes les fois qu'un conducteur isolé présente des pointes, il conserve l'électricité pendant très-peu de temps; aussi peut-on remarquer que tous les appareils électriques se terminent par des boules ou des parties arrondies.

425. Déperdition de l'électricité. — Lorsqu'un corps conducteur isolé et électrisé est abandonné à lui-même, l'électricité se dissipe peu à peu, et, au bout d'un temps variable, suivant les cas, il ne conserve plus aucune trace d'électrisation.

Les causes de cette déperdition sont assez complexes : il y a d'abord la propagation par les supports, qui ne sont jamais isolants et qui peuvent d'ailleurs se recouvrir d'une couche d'humidité plus ou moins grande provenant de l'air. L'écoulement peut aussi se faire dans l'air considéré comme corps isolant; en outre, les molécules d'air, qui viennent successivement au contact du corps électrisé, partagent son électricité et sont repoussées par lui en emportant une portion de la charge. En fait, c'est surtout à l'humidité de l'air qu'il faut attribuer la déperdition ; lorsque cette humidité est un peu considérable, les expériences d'électricité deviennent littéralement impossibles. Au contraire, dans une cloche renfermant de l'air complétement desséché, un corps peut rester électrisé pendant un temps très-considérable.

Il résulte des recherches de Coulomb sur ce point, que le pouvoir isolant des corps mauvais conducteurs augmente beaucoup quand la section de ces corps diminue, de telle sorte qu'on peut arriver à les choisir assez minces pour que l'isolement soit complet, ou que, du moins, il ne se produise pas par le support une perte plus grande que par l'air. Quant à la déperdition par l'air, elle dépend de causes trop nombreuses pour qu'il soit possible, dans l'état actuel de la science du moins, de formuler une loi précise à ce sujet. Coulomb, en observant dans des circonstances spéciales le décroissement de la force répulsive des deux boules de sa

balance, avait remarqué que la valeur de ce décroissement était à chaque instant proportionnelle à la force répulsive elle-même. Cette loi, tout à fait analogue à la loi du refroidissement de Newton, ne se vérifie pas d'une manière générale, et surtout quand les boules sont un peu voisines l'une de l'autre.

La force élastique de l'air ambiant joue un rôle important dans la déperdition. Suivant qu'elle augmente ou qu'elle diminue, la charge que peut conserver un corps conducteur augmente ou diminue elle-même d'une manière proportionnelle; ainsi, dans le vide, aucune charge n'est possible et toute trace d'électricité disparaît. D'autre part, cette charge, compatible avec l'état de densité de l'air ambiant, se dissipe d'autant plus lentement que la force élastique est plus faible.

CHAPITRE XXXVIII.

MACHINES ÉLECTRIQUES.

426. Machines électriques. — La première machine électrique est due à Otto de Guericke, auquel, ainsi que nous l'avons dit (129), la science doit aussi la découverte de la machine pneumatique. La machine d'Otto de Guericke se composait d'un globe de soufre, traversé par un axe auquel une personne imprimait un mouvement de rotation, tandis qu'une autre appuyait les mains sur la sphère et produisait ainsi le frottement nécessaire au développement de l'électricité. Par suite de la friction le soufre s'électrisait négativement et l'électricité positive s'écoulait dans le sol par la main de l'observateur. Les effets produits par cette machine étaient peu intenses, les étincelles notamment avaient peu d'éclat et elles n'étaient vraiment visibles qu'autant qu'on opérait dans l'obscurité. Un physicien anglais, à peu près contemporain d'Otto de Guericke, Hauksbee, eut l'idée de remplacer le globe de soufre par un globe de verre ; l'électricité obtenue ainsi était positive, et les effets lumineux présentaient avec la machine modifiée une remarquable intensité. Toutefois cet appareil fut oublié ou abandonné pendant longtemps, et c'est seulement vers le milieu du XVIIIe siècle, au temps de l'abbé Nollet, qu'un expérimentateur allemand, Boze, professeur de physique à Wittemberg, fit revivre en la perfectionnant la machine d'Hauksbee, qui fut généralement adoptée.

La figure 349, empruntée aux *Leçons de physique* de l'abbé Nollet, publiées en 1767, montre la disposition de la machine adoptée par ce célèbre professeur. Elle se compose d'une roue de

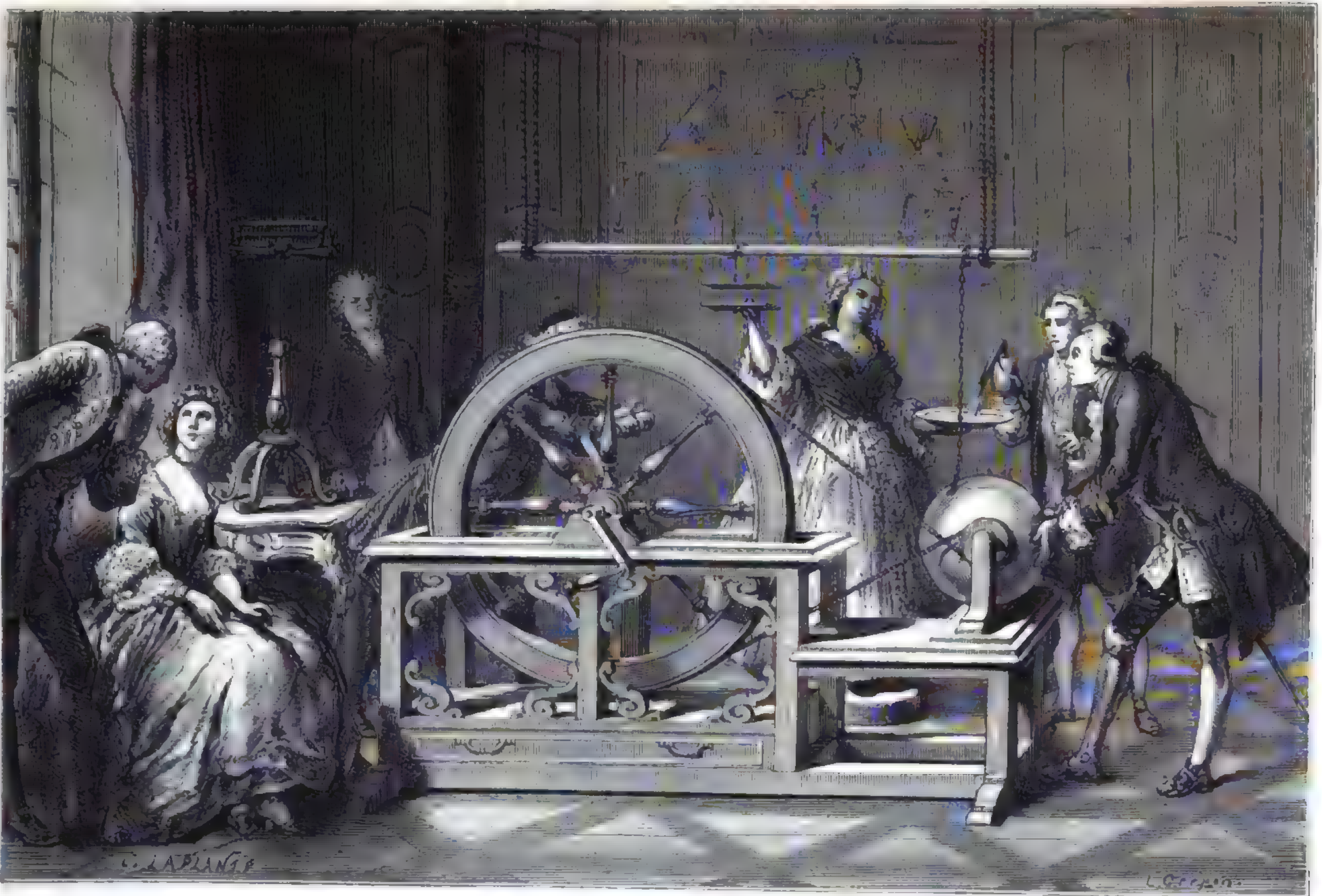


Fig. 340. — Machine électrique d'Hauksbee.

dimensions considérables, dont la rotation se transmet par le moyen d'une corde sans fin et d'une poulie à un globe de verre. L'électricité développée sur le globe est recueillie par un conducteur suspendu au plafond à l'aide de cordons de soie.

On voit dans cette figure que le frottement est produit par la main d'une personne; on fit beaucoup d'essais pour remplacer ce procédé, évidemment défectueux et primitif, par l'emploi de frottoirs en cuir rembourrés avec du crin, qu'au moyen de vis on approchait plus ou moins du globe de verre. Mais la forme de ce dernier rendait la construction des frottoirs fort difficile, et beaucoup de physiciens revinrent à l'ancien mode. Ce ne fut que lorsqu'on substitua des cylindres aux globes que l'usage des frottoirs devint général.

427. Machine de Ramsden. — Aujourd'hui on se sert assez généralement des machines à plateaux imaginées, vers 1768, par le célèbre artiste Ramsden, et qui n'ont subi depuis cette époque que des modifications insignifiantes.

La figure 350 représente le modèle le plus répandu dans les cabinets de physique. Il se compose d'un plateau en verre de forme circulaire, qu'on peut faire tourner entre quatre coussins. Deux de ces coussins sont à la partie supérieure et les deux autres à la partie inférieure de deux montants en bois parallèles qui supportent l'axe du plateau. En face du plateau sont disposés des conducteurs métalliques soutenus par des pieds de verre et se terminant par deux branches recourbées qui embrassent le plateau aux deux extrémités d'un diamètre horizontal; l'intérieur de ces branches est garni de pointes. Le plateau, par son frottement contre les coussins, se charge d'électricité positive; cette électricité agissant par influence sur l'électricité des conducteurs la décompose en électricité positive qui demeure sur leur surface et en électricité négative qui, s'écoulant par les pointes, va remettre le plateau à l'état naturel. Mais celui-ci s'électrise de nouveau entre les deux autres coussins et ainsi de suite, de sorte que si l'on continue à tourner le plateau, les conducteurs restent constamment chargés d'électricité positive. Si l'on cesse de tourner, l'électricité positive elle-même s'écoule par les pointes, se dissipe dans l'air et ne tarde pas à disparaître plus ou moins rapidement, suivant l'état d'hu-

midité de l'atmosphère. Pour éviter la déperdition de l'électricité dans le trajet des coussins aux branches métalliques, on dispose des secteurs en taffetas sur la portion du plateau qui suit les coussins dans le sens ordinaire du mouvement. Le plateau de verre

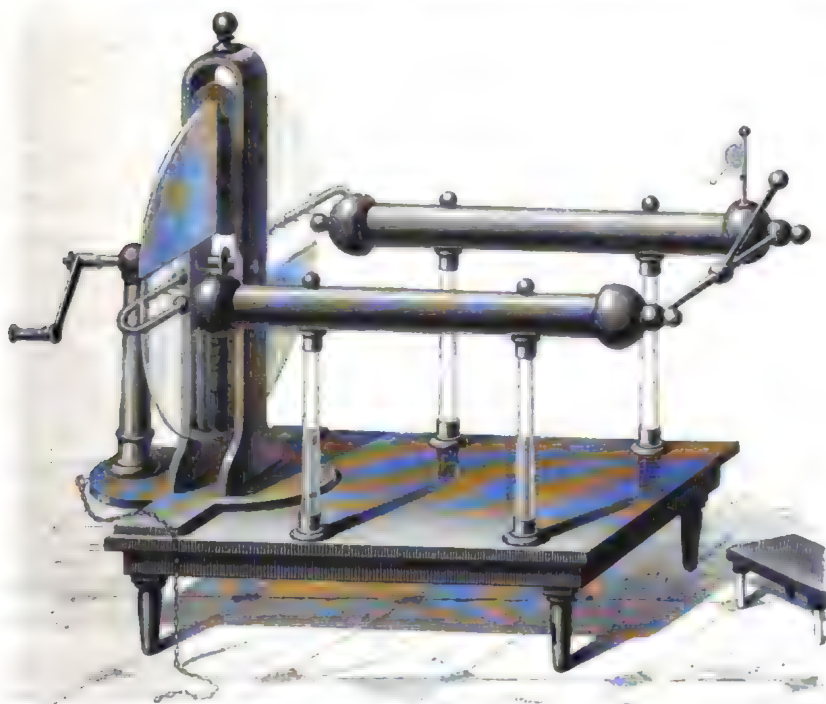


Fig. 350. — Machine de Ramsden.

s'électrisant positivement, les coussins s'électrisent négativement; il est important que cette électricité négative disparaisse, car elle agirait sur les conducteurs en sens inverse du plateau. On met dans ce but les coussins en pleine communication avec le sol par le moyen d'une languette métallique incrustée dans les montants.

428. Charge limite de la machine. — La décomposition par influence exercée par le plateau tournant sur les conducteurs a évidemment une limite. En effet, l'action décomposante du plateau de verre s'exerce principalement sur les parties les plus rapprochées du conducteur, et donne lieu à du fluide positif qui se répand sur sa surface. Mais celui-ci agit alors en sens inverse du plateau, de

sorte qu'il arrivera nécessairement un instant où l'équilibre s'établira entre ces forces contraires. La charge électrique de la machine aura alors atteint sa limite. Remarquons d'ailleurs que cette limite sera très-variable suivant l'état de l'air; car la déperdition est continuelle et peut devenir très-intense par les temps humides. Dans ce cas, à partir d'un certain moment, toute la quantité d'électricité fournie par l'action du plateau se trouve absorbée par l'air ambiant et la charge de la machine peut être très-faible.

Quand l'air est très-sec, il n'y a, pour ainsi dire, aucune précaution à prendre pour que la machine donne tout l'effet dont elle est susceptible; il n'en est pas de même quand l'air est humide, et dans ce cas, si on ne prenait pas tous les soins nécessaires à la préparation de la machine, on pourrait n'obtenir absolument aucun effet.

La première observation se rapporte aux coussins. Le frottement du cuir contre le verre ne donne qu'une quantité d'électricité médiocre. Il convient d'enduire la surface soit d'or mussif (deutosulfure d'étain), soit d'un alliage formé avec une partie d'étain, une partie de zinc et deux parties de mercure (amalgame de Kienmeier). Pour effectuer cette opération, on enduit les frottoirs d'une petite quantité d'un corps gras, on ajoute l'or mussif ou l'amalgame et, après avoir chauffé un peu les coussins, on les frotte à plusieurs reprises l'un contre l'autre de manière à égaliser la couche superficielle, condition nécessaire d'un contact bien intime avec le plateau.

Les coussins en cuir rembourrés avec du crin présentent une surface bombée qui ne touche qu'imparfaitement le plateau; on leur substitue souvent avec avantage des coussins plats dont le corps est formé par des couches de flanelle superposées. Ils sont recouverts d'une lame de taffetas sur laquelle on étend l'amalgame de Kienmeier; une lame d'étain placée sur le pourtour et à la partie postérieure permet d'établir la pleine communication avec le sol.

Après avoir préparé les frottoirs, il faut essuyer avec un linge sec et chaud les pieds isolants des conducteurs. Le plateau doit être ensuite nettoyé, débarrassé des grains de poussière et des particules d'amalgame qu'il pourrait renfermer, et enfin essuyé avec un linge ou un papier sec et chaud.

Il conviendra aussi généralement de placer au-dessous des conducteurs, entre les pieds de la machine, un petit fourneau allumé qui diminue l'état hygrométrique de l'air ambiant.

Quand on prend soigneusement toutes ces précautions, quel que soit l'état de l'air, on parvient à faire fonctionner la machine *seule* d'une façon très-convenable; mais il n'en est pas de même quand il s'agit de charger un condensateur ou une batterie ; cette dernière opération est souvent impossible, nous en verrons la raison plus loin.

La manière dont la machine se charge et conserve son électricité est accusée par l'électromètre à cadran. Cet instrument est formé d'un support conducteur (fig. 351), portant un cadran en ivoire. Au centre du cadran se trouve un petit pendule formé d'une tige aussi en ivoire et d'une petite balle en moelle de sureau. Lorsque les conducteurs s'électrisent, le pendule est repoussé et s'écarte d'un angle d'autant plus grand et d'autant plus vite que la charge est plus forte et que la déperdition est moindre. Quand l'air est très-humide et qu'on cesse de tourner, on voit le pendule retomber instantanément dans la verticale, tandis que par un temps sec il s'abaisse lentement et présente encore un écart sensible au bout de deux ou trois minutes.

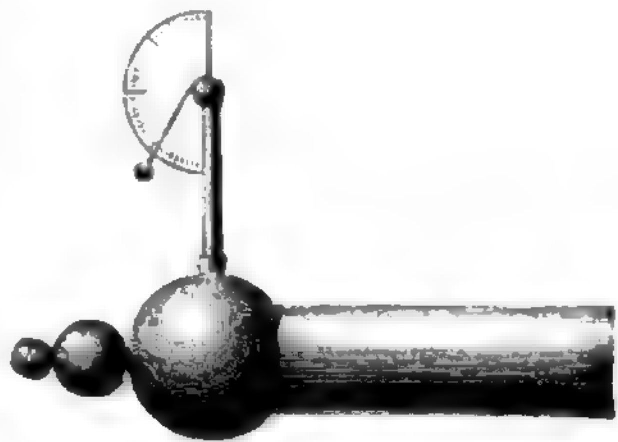


Fig. 351. — Électromètre à cadran.

429. Machine de Nairne. — La machine de Ramsden ne fournit que de l'électricité positive; pour avoir de l'électricité négative, il faudrait isoler du sol les coussins et les mettre en communication avec un conducteur isolé. C'est une disposition de ce genre qui est employée dans la machine de Nairne.

Un large cylindre de verre (fig. 352), rétréci à ses deux extrémités, se termine par deux parties métalliques qui sont sur le prolongement de l'axe et reposent sur deux coussinets. L'une de ces extrémités est munie d'une manivelle. Parallèlement au cylindre de verre, sont placés deux cylindres en cuivre et isolés; l'un d'eux est armé de pointes en regard du conducteur de la machine, l'autre

communique avec un frottoir et recueille, par conséquent, l'électricité de ce dernier. On peut ne conserver que l'une des deux électricités; il suffit pour cela de faire communiquer avec le sol

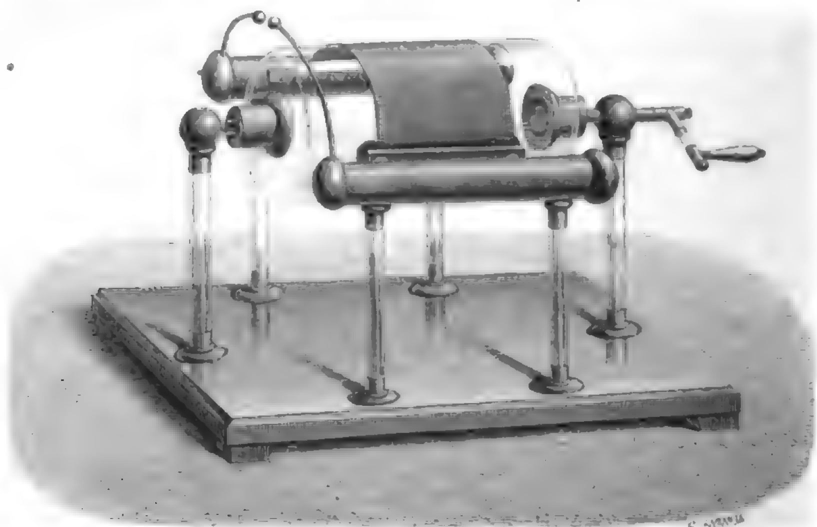


Fig. 352. — Machine de Nairne.

le conducteur correspondant à l'autre électricité. La machine de Nairne est aujourd'hui très-peu répandue.

430. Machine de M. Winter. — M. Winter, de Vienne, a construit un modèle modifié de la machine à plateau, qui est assez répandu en Autriche et qui paraît présenter quelques avantages.

Il y a, comme le montre la figure 353, une seule paire de coussins, en communication avec une sphère métallique supportée par une colonne de verre. Cette sphère peut être employée à recueillir l'électricité négative, comme cela a lieu dans le conducteur négatif de la machine de Nairne. Le conducteur principal est formé d'une sphère isolée surmontée en général d'une sphère plus petite. A l'extrémité du diamètre passant par le frottoir, se trouve un anneau en bois servant à recueillir l'électricité du plateau. Il présente, à cet effet, une fente assez large pour permetttre le passage du plateau; les deux faces en regard de ce dernier sont évidées et garnies chacune d'une lame de laiton armée de pointes, de façon à favoriser l'écoulement du fluide.

La machine de Winter paraît donner, toutes choses égales d'ailleurs, des étincelles plus longues que la machine ordinaire. Cette circonstance est due, en partie du moins, à la distance consi-

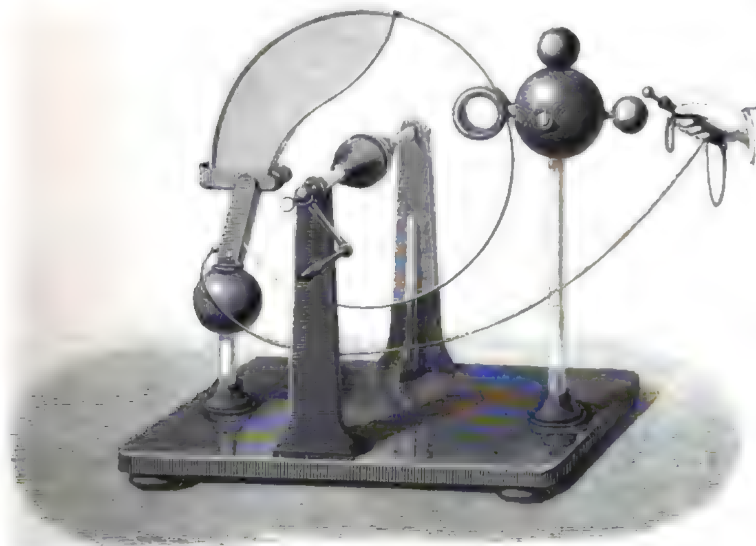


Fig. 353. — Machine de M. Winter.

dérable qui sépare le frottoir du conducteur ; de cette façon, les décharges entre ces deux parties de la machine ne peuvent se produire; ces décharges latérales contribuent notablement, dans le système ordinaire, à diminuer la tension limite.

431. Machine hydro-électrique. — M. Armstrong a fait connaître, vers 1840, une machine électrique fondée sur le frottement de la vapeur contre les parois des orifices par lesquels elle s'échappe sous une forte pression. Cette machine se compose (fig. 354) d'une chaudière à foyer intérieur, supportée par des pieds de verre. La vapeur, avant de s'échapper, passe par l'intermédiaire de tubes dans une boîte réfrigérante contenant de l'eau. Des mèches de coton plongent dans cette eau et l'amènent par capillarité au contact des tubes sur lesquels elles reposent. Il en résulte un refroidissement qui détermine la liquéfaction partielle de la vapeur. On a reconnu que c'était là une condition indispensable, le frottement de la vapeur parfaitement *sèche* ne développant pas d'électricité. Ce n'est donc pas,

à proprement parler, la vapeur qui donne l'électricité, ce sont les gouttelettes d'eau, et la vapeur ne constitue qu'un moyen de produire une friction énergique. Quoi qu'il en soit, le jet de vapeur s'électrise positivement et la chaudière négativement. Pour recueillir



Fig. 354. — Machine d'Armstrong.

l'électricité positive, on dirige le courant de vapeur sur un peigne métallique en communication avec un conducteur isolé.

La disposition des ajutages par lesquels la vapeur s'échappe a une importance fondamentale. La figure 355 montre comment la vapeur, arrêtée dans sa marche par une languette métallique, contourne cet obstacle et s'échappe finalement par le tube formé ordinairement de buis.

Pour que la machine hydro-électrique fonctionne bien, il faut que la pression soit de 7 à 8 atmosphères; l'eau qui remplit la chaudière doit d'ailleurs être de l'eau distillée. Si dans le tube qui précède le bec de dégagement on introduit une dissolution saline, toute trace d'électricité disparaît immédiatement. La nature des parois qui constituent le tube de dégagement influe sur le développement de l'électricité; il en est de même de la nature du liquide que la vapeur entraîne. Ainsi, lorsqu'on introduit dans le jet de vapeur une petite quantité d'essence de térébenthine, la chaudière s'électrise positivement.

La machine hydro-électrique a une très-grande puissance. L'Institut polytechnique de Londres en possède une dont la chaudière, de 2 mètres de longueur sur 1 mètre de diamètre environ, présente 46 becs de dégagement. Les étincelles, qui peuvent atteindre 60 centimètres de longueur, ont une intensité vraiment redoutable. Toutefois ce sont des appareils d'un maniement fort incommode; la mise en pression de la vapeur d'eau, à 7 ou 8 atmosphères, demande un chauffage prolongé; la chaudière doit d'ailleurs être chaque fois lavée très-soigneusement à la potasse, et enfin le fonctionnement de la machine est accompagné d'un énorme dégagement de vapeur, qui, outre le bruit intolérable qui l'accompagne, a le fâcheux effet de couvrir d'humidité les appareils. Aussi la machine hydro-électrique est restée un appareil spécial, dont on peut constater, à un moment donné, les curieux effets, mais dont on ne se sert point pour la production courante de l'électricité.

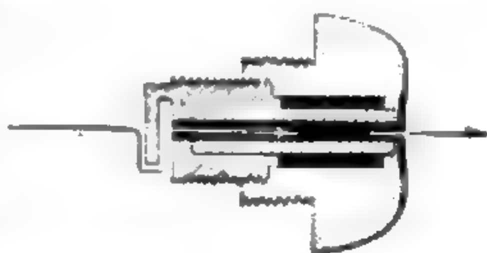


Fig. 355. — Orifice d'écoulement de la vapeur.

432. Machine de M. Holtz. — Dans les machines qui viennent d'être décrites, l'électricité est produite par le frottement continu d'une substance contre une autre. On connaît aujourd'hui des appareils d'un genre tout différent, dans lesquels un corps électrisé, une fois pour toutes, agit par influence sur un système mobile et donne lieu à une production continue d'électricité. M. Holtz, de Berlin, et M. Toppler, de Riga, ont, dans le courant de l'année 1865, fait connaître, chacun de leur côté, un appareil fondé sur ce principe nouveau. La machine de M. Toppler, très-compliquée d'ailleurs, est

peu répandue, et les savants français ne la connaissent que par le modèle qui figurait à l'Exposition de 1867.

La machine de M. Holtz est au contraire très-répandue; son maniement est des plus faciles et son introduction dans les cabi-

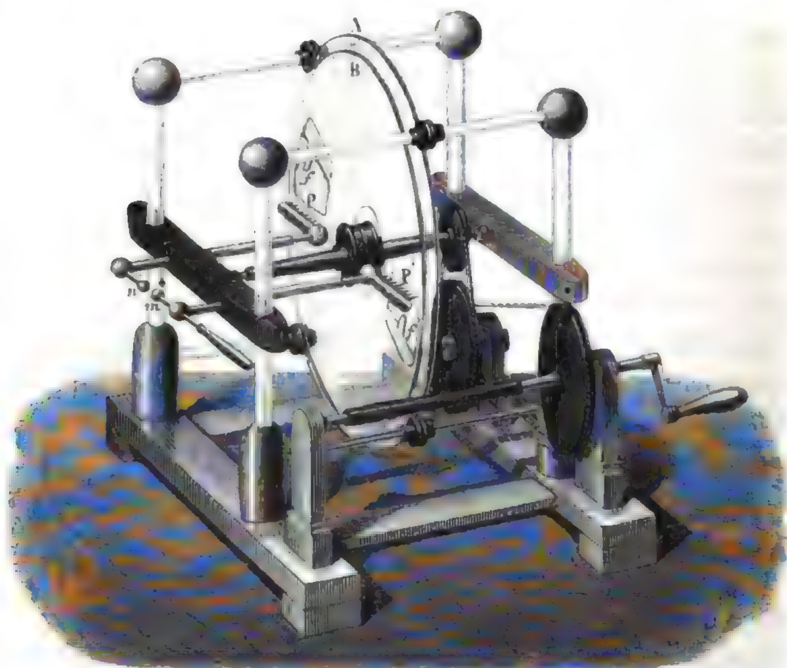


Fig. 356. — Machine de Holtz.

nets de physique constitue un service très-sérieux rendu aux sciences et à l'enseignement.

La machine se compose d'un plateau de verre fixe A, au-devant duquel tourne un plateau mobile B de la même substance; sur le plateau fixe, aux extrémités du diamètre horizontal, sont pratiquées deux ouvertures munies chacune d'une armature en carton; ces dernières présentent, comme le montre la figure, deux pointes *f*, *f* dirigées en sens contraire du mouvement du plateau. Deux peignes métalliques P et P' sont placés en regard des fenêtres, mais de l'autre côté du plateau mobile; ils communiquent avec deux conducteurs isolés, terminés par les boules *n* et *m*, que l'on peut appeler les pôles de la machine, et qui peuvent être approchées plus ou moins l'une

de l'autre. Pour mettre l'appareil en activité, on amène en contact les deux boules *m* et *n*, et on électrise l'une des deux armatures, *f* par exemple, en la mettant en communication avec une plaque de caoutchouc électrisée négativement; on fait alors tourner le plateau pendant quelques instants, et on sépare graduellement les deux boules.

Il se produit immédiatement entre elles une sorte de bruissement continu, résultant de la réunion rapide des électricités contraires des deux pôles. Dans les conditions indiquées, la boule *n* forme le pôle négatif et la boule *m* le pôle positif de l'appareil. Par un temps sec, la machine, une fois amorcée, peut fonctionner pendant un temps très-considérable, pourvu que l'on continue à tourner le plateau; mais elle s'arrête rapidement quand l'air est chargé d'humidité, qui paraît même avoir sur elle une influence plus fâcheuse encore que sur la machine ordinaire. La théorie des deux fluides rend suffisamment compte de la nature des effets produits. En effet, dans cette machine, l'électricité négative de l'armure *f* décompose par influence le fluide neutre du conducteur qui lui prend sa charge et se trouve ainsi électrisé négativement. Quant à l'électricité positive, elle s'écoule par le peigne et vient charger la partie du plateau mobile qui lui fait face; celui-ci demeure électrisé positivement jusqu'au moment où il se trouve amené par la rotation en regard de la pointe de l'armure *f'*; celle-ci se charge donc positivement et le fluide négatif vient de l'autre côté du plateau tournant, qui se trouve ainsi avoir deux charges contraires sur ses faces opposées, et qui peut être considéré, par conséquent, comme à l'état naturel. Mais alors, par l'action de l'armure positive *f'*, il se produit un phénomène inverse de celui qui avait eu lieu en *f*, et le conducteur *m* se charge d'électricité positive, tandis que l'électricité négative vient neutraliser celle de nom contraire qui se trouvait sur le plateau tournant. Celui-ci, ne conservant plus que son action négative, maintient par son influence la charge de l'armature *f*, qui agit à son tour sur le conducteur correspondant et ainsi de suite. On voit donc que l'électrisation primitive une fois produite, s'il n'y a pas une déperdition trop considérable d'électricité, le mouvement du plateau entretient les charges contraires des deux

armatures qui, à leur tour, maintiennent les deux conducteurs dans des états électriques opposés.

Nous n'avons pas tenu compte, dans cette explication, de l'influence exercée sur le plateau tournant lui-même; il est clair qu'elle aurait pour résultat de constituer un état électrique inverse de celui qui donne lieu aux effets ordinaires de la machine; mais la mauvaise conductibilité du plateau empêche la décomposition de son fluide neutre de se produire avec un peu d'intensité : on peut donc considérer comme tout à fait insignifiant le rôle qu'elle joue. On pourrait toutefois concevoir que dans certaines circonstances il n'en fût pas de même, et alors le fonctionnement de la machine en serait sensiblement altéré.

M. Holtz a tout récemment fait subir à sa machine une modifi-

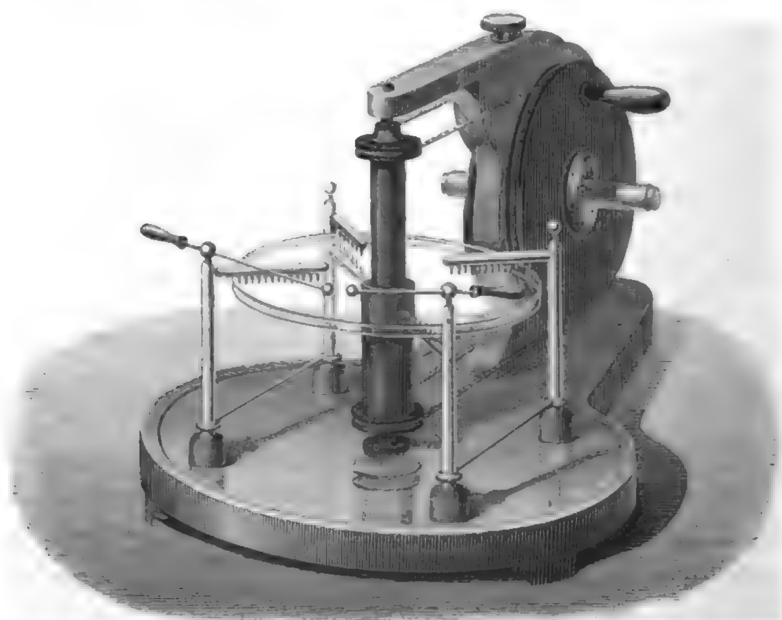


Fig. 357. — Machine de Holtz à plateaux horizontaux.

cation très-intéressante. Les deux plateaux sont disposés horizontalement (fig. 357), ils ne présentent plus de fenêtre ni d'armature, et ils reçoivent tous deux un mouvement de rotation en sens contraire l'un de l'autre. Deux conducteurs armés de peignes sont placés au-

dessus du disque supérieur, aux extrémités d'un diamètre, et deux autres au-dessous du disque inférieur, aux extrémités du diamètre perpendiculaire. Le tout forme deux couples provenant chacun de la réunion d'un conducteur supérieur avec un conducteur inférieur. Pour amorcer la machine, on place un secteur de caoutchouc électrisé sur le disque supérieur en face d'un des peignes inférieurs; au bout de quelques instants de rotation le secteur peut être enlevé et un flux continu d'électricité jaillit entre deux des pôles opposés des couples conducteurs. On place souvent, comme le montre la figure, à la partie supérieure, un peigne opposé au peigne inférieur. Cette disposition, qui n'est pas nécessaire, paraît augmenter l'effet de la machine.

La théorie de l'électricité par influence s'applique à cette nouvelle disposition de la machine de Holtz, dans laquelle les peignes jouent, par rapport au plateau opposé, le rôle que jouent dans la première machine les armatures de carton par rapport au plateau mobile. Sans entrer dans plus de détails, il est impossible de ne pas remarquer dans ces curieux appareils une transformation du mouvement en électricité analogue à la transformation du mouvement en chaleur dont nous avons parlé plusieurs fois.

433. Électrophores. — On a souvent besoin, dans les laboratoires, d'une étincelle électrique; il est facile de l'obtenir en employant un appareil beaucoup plus simple que la machine électrique que l'on nomme *électrophore.*

Il se compose d'un disque de résine (fig. 358) sur lequel repose un plateau conducteur B supporté par un manche isolant CD. On électrise le premier en le frottant avec une peau de chat ou avec une étoffe de laine, puis on place au-dessus le plateau conducteur.



Fig. 358. — Électrophore.

L'électricité neutre de ce dernier est décomposée par l'électricité négative de la résine, le fluide positif est attiré à la partie inférieure et le fluide négatif repoussé à la partie supérieure. Si alors on touche le plateau conducteur avec le doigt, le fluide repoussé s'écoule dans

le sol et il ne reste que le fluide positif; si donc on soulève le plateau par son manche isolant, ce fluide se répandra librement sur sa surface et on pourra en tirer une étincelle. Comme la résine garde longtemps son électricité, surtout si l'air est sec, en posant de nouveau le plateau conducteur et opérant de la même manière, on pourra obtenir successivement un très-grand nombre d'étincelles.

434. Électrophore tournant de M. Bertsch. — On voit que, pour obtenir avec l'électrophore des étincelles successives, il faut alternativement élever et abaisser le plateau. On peut remplacer ce mouvement alternatif par un mouvement tournant; c'est à peu près ce qui a lieu dans la machine que représente la figure 360 et qui a été récemment construite par M. Bertsch.

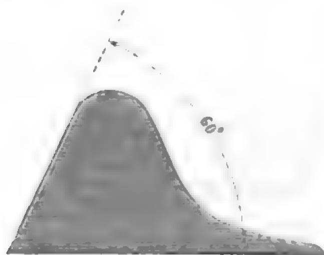


Fig. 359.

On électrise un secteur en caoutchouc durci (fig. 359) et on le place à la partie inférieure d'un plateau de même nature D (fig. 360) auquel on imprime un mouvement de rotation. En regard de la partie inférieure du plateau se trouve un peigne métallique N faisant partie d'un conducteur C en communication avec le sol. A la partie supérieure, un autre peigne M communique avec le conducteur A. Sous l'action du secteur électrisé, le conducteur C fournit par le peigne N du fluide positif qui vient charger la portion du plateau qui est en regard. En passant devant le peigne supérieur, le plateau agissant par influence électrise positivement le conducteur et revient à l'état naturel. On aura donc, par la rotation continue, une production constante d'électricité dans le conducteur A, qui joue ici le rôle du plateau conducteur de l'électrophore. On augmente très-sensiblement l'effet produit en mettant le conducteur A en communication avec un conducteur de grandes dimensions E.

Malgré l'analogie réelle qui existe entre la machine que nous venons de décrire et celle de M. Holtz, il y a lieu de remarquer toutefois que, d'après le jeu de cette dernière, la charge primitivement imprimée se maintient sur les armures, tandis qu'ici c'est un

corps électrisé qui agit par sa charge et dont l'action diminue naturellement à mesure qu'il y a déperdition; c'est, en d'autres termes,

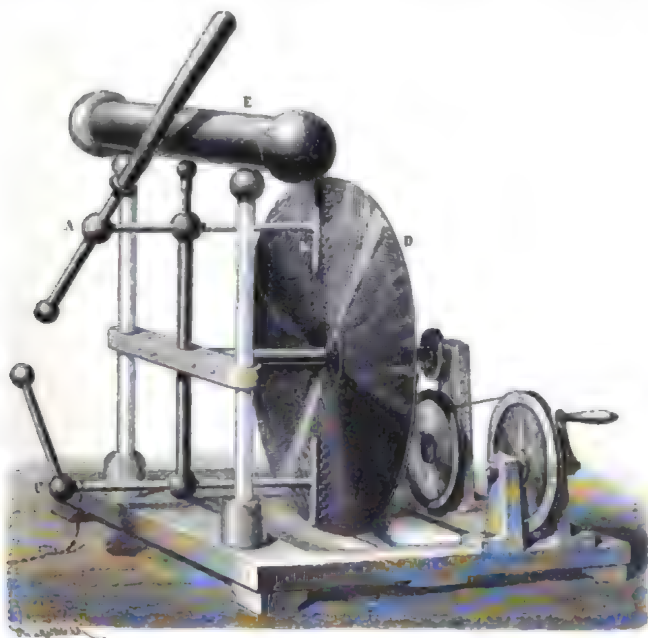


Fig. 360. — Machine de M. Bertsch.

un électrophore qui demeure plus ou moins complétement chargé, tandis que dans la machine de Holtz c'est un électrophore qui se recharge de lui-même à chaque révolution du plateau mobile.

CHAPITRE XXXIX.

EXPÉRIENCES DIVERSES AVEC LA MACHINE ÉLECTRIQUE.

435. Étincelle électrique. — L'étincelle électrique que l'on obtient des conducteurs d'une machine électrique de faibles dimensions est courte et généralement rectiligne. Mais quand la machine est puissante, ces étincelles peuvent acquérir une longueur de $0^m,30$ et au delà. Dans ce cas elles présentent une forme en zigzag, dont l'analogie avec l'éclair est on ne peut plus frappante. L'un des moyens les plus convenables pour obtenir de longues étincelles consiste à placer en regard d'une des petites sphères de la machine (fig. 361) un plateau conducteur que l'on tient à la main, ou que l'on met en communication avec le sol par une chaîne, si l'on veut éviter de sentir la secousse. On aurait des effets plus marqués en faisant communiquer le plateau avec les frottoirs rendus isolés dans la machine ordinaire, ou avec le conducteur négatif dans la machine de Winter.

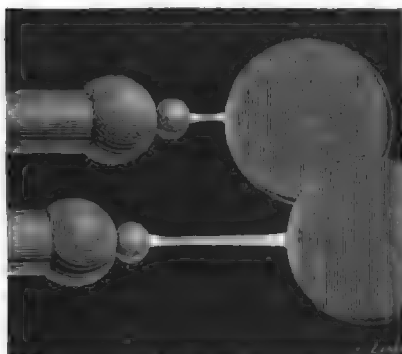


Fig. 361. — Étincelle électrique.

Assez fréquemment, quand la longueur de l'étincelle atteint ou dépasse $0^m,30$, le trait de feu qui la forme fournit latéralement sur tous les points de son parcours des ramifications déliées de longueur variable, ainsi que le montre la figure 362. Ce sont des espèces de décharges latérales accusant une véritable tension

électrique dans le corps même de l'étincelle.

On s'est beaucoup occupé autrefois des moyens d'accroître la longueur des étincelles que peut fournir une machine, et on a reconnu qu'il convenait de faire communiquer les conducteurs principaux de la machine avec des conducteurs de section plus petite et d'une assez grande longueur, appelés conducteurs secondaires. Volta employait douze cylindres de 0m, 013 de diamètre et de près de 3 mètres de longueur, communiquant ensemble, mais placés assez loin les uns des autres pour ne pas se nuire par leur influence mutuelle. Il obtenait ainsi de très-grandes étincelles, dont la longueur atteignait parfois 60 centimètres, et capables de produire sur les organes un effet vraiment redoutable.



Fig. 362. — Étincelle électrique ramifiée.

436. Aigrettes lumineuses. — Lorsqu'une puissante machine électrique fonctionne par un temps très-sec, que les frottoirs préparés convenablement ont leur maximum d'effet et que l'on tourne

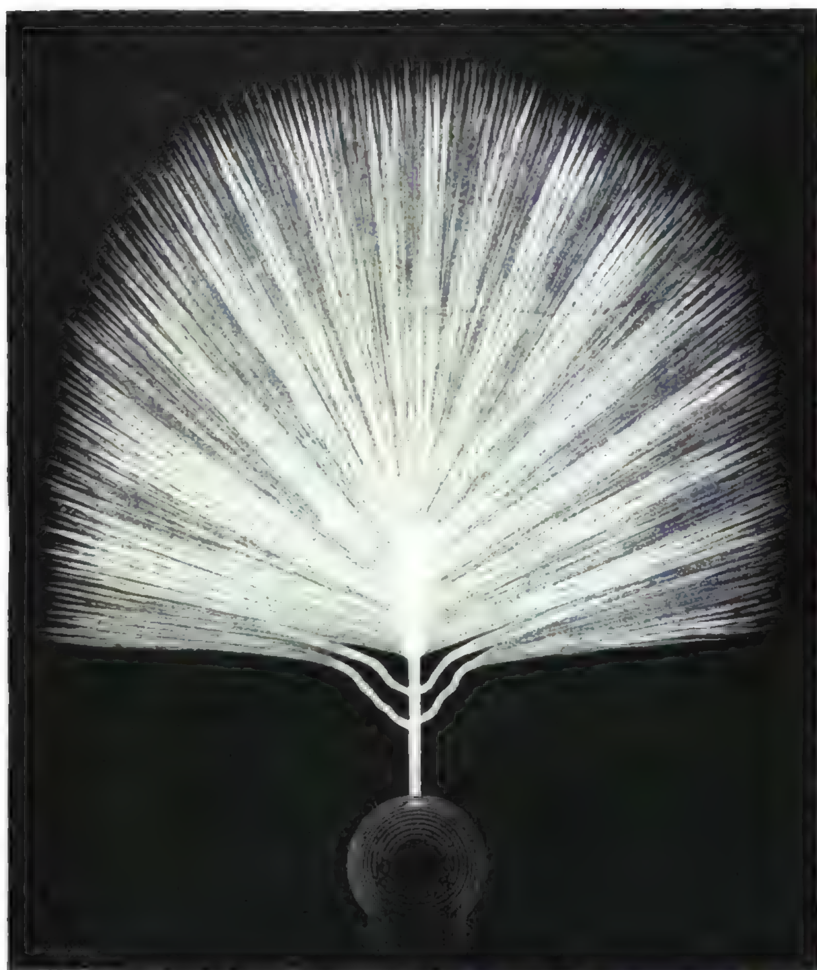


Fig. 363. — Aigrette électrique d'après Van Marum.

le plateau avec rapidité, on entend un bruissement caractéristique, qui est le signe d'une décharge continue dans l'air ; si l'on opère dans l'obscurité, on voit en effet se produire, sur divers points des conducteurs, des lueurs auxquelles on a donné le nom d'*aigrettes*. On peut les rendre très-apparentes en approchant un corps conduc-

teur à une certaine distance, plus grande toutefois que celle qui donnerait lieu à une étincelle proprement dite. On reconnaît ainsi que l'aigrette est formée d'une sorte de pédicule (fig. 363) plus ou moins allongé, du sommet duquel divergent en éventail des traits déliés qui se ramifient à leur tour un plus ou moins grand nombre de fois. Elle est plus marquée pour l'électricité positive que pour l'électricité négative. Ajoutons d'ailleurs que, dans les conditions de bon fonctionnement de la machine, de brillantes étincelles sillonnent à chaque instant le plateau, par suite des décharges produites entre les frottoirs et les branches recourbées des conducteurs; les conducteurs sont eux-mêmes entourés de lueurs. Dans l'obscurité, l'éclat lumineux de cet ensemble de phénomènes, les pétillements de l'électricité, constituent un spectacle intéressant et qui excitait, sans jamais l'épuiser, la curiosité des électriciens du siècle dernier.

437. Durée de l'étincelle. — L'étincelle électrique a une durée excessivement courte et dont l'impression que nous éprouvons ne saurait donner une idée juste, parce que le mouvement communiqué à la rétine par la lumière persiste pendant un temps plus ou moins grand et qui ne s'éloigne pas beaucoup de $\frac{1}{10}$ de seconde. Si donc un phénomène lumineux dure moins de $\frac{1}{10}$ de seconde, nous ne pouvons porter aucun jugement exact sur sa durée. M. Wheatstone a mesuré la durée de l'étincelle en employant un miroir tournant, mode d'expérience que l'on a utilisé depuis dans diverses recherches, et particulièrement dans la mesure de la vitesse de la lumière.

Soit mn (fig. 364) un miroir tournant avec une grande vitesse, et supposons que pendant la rotation on produise une étincelle électrique en a; l'œil placé en o verra une image dans la position symétrique a'. Si l'étincelle est instantanée, malgré la rotation du miroir, on ne verra qu'un point lumineux a'; mais si au contraire elle dure un certain temps, il se produira une série d'images depuis le point a' jusqu'au point a'' correspondant à la position tt' du miroir à la fin de l'étincelle, et par conséquent l'œil apercevra une bande circulaire $a'a''$, d'une étendue angulaire plus ou moins considérable.

Remarquons actuellement que les deux angles ect et $a'aa''$ sont

égaux comme ayant les côtés perpendiculaires; mais le premier étant un angle inscrit, l'arc $a'a''$ doit être le double de l'arc et. Dans l'expérience de M. Wheatstone, la vitesse de rotation du miroir était de 800 tours par seconde, et l'image de l'étincelle produite était formée par une bande occupant une largeur $a'a''$ égale à 24° ; le miroir avait donc tourné, pendant la durée de l'étincelle, d'un angle égal à 12°, c'est-à-dire de $\frac{1}{30}$ de la circonférence. Mais puisque 800 tours s'accomplissent en une seconde, $\frac{1}{30}$ de tour dure $\frac{1}{24000}$ de seconde : c'est précisément la durée de l'étincelle électrique.



Fig. 364. — Mesure de la durée de l'étincelle.

438. Étincelle dans les gaz raréfiés. — L'aspect de l'étincelle se modifie considérablement quand on opère dans les gaz raréfiés. On se sert, pour ce genre d'expériences, de l'appareil nommé *œuf électrique*. C'est un ballon de verre (fig. 365), de forme ovoïde, dans lequel on peut faire le vide à l'aide d'un robinet placé à la partie inférieure. La garniture supérieure est traversée par une tige conductrice, terminée inférieurement par une boule qui peut être placée à des distances variables d'une seconde boule fixe communiquant avec la garniture inférieure de l'appareil.

Lorsque l'œuf est rempli d'air à la pression ordinaire, il se produit entre les deux boules une étincelle analogue à celles qui ont été précédemment décrites; mais lorsque la pression diminue, l'aspect change complétement. A une pression de 6 centimètres de mercure, il s'échappe de la boule positive une sorte de gerbe ramifiée dont quelques rayons se terminent à une petite distance, tandis que d'autres vont rejoindre la boule négative; celle-ci est d'ailleurs entourée d'une lueur violette; les rayons sont

1. Gerbe lumineuse [illegible] — 2. Phosphorescence du sulfure de calcium. — 3. Tubes de Geissler, lumière stratifiée.
4. Fluorescence du verre d'urane. 5. Phosphorescence du sulfure de strontium. — 6. Fluorescence du verre d'urane et du sulfate de quinine.

LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE

DANS LES GAZ RARÉFIÉS

[illegible]

violets aussi, mais d'un ton plus vif; quant à la boule positive, elle présente une couleur purpurine très-marquée.

Lorsque la pression diminue encore, jusqu'à n'être plus égale qu'à quelques millimètres, les rayons s'élargissent, et finalement on n'observe plus qu'une sorte de vapeur violacée, de forme ovoïde,



Fig. 365. — Œuf électrique.



Fig. 366. — Étincelle dans l'air raréfié.

établissant la communication entre les deux boules, avec une teinte violet sombre à la boule négative, et rougeâtre à la boule positive. Pour faire ces expériences avec la machine électrique ordinaire, on fait communiquer le conducteur de la machine avec la garniture supérieure de l'œuf, tandis que la garniture inférieure est mise en communication avec le sol. Pour les expériences de cette nature on peut employer très-avantageusement la machine de Holtz, dont les deux pôles sont mis en rapport avec les garnitures de l'œuf.

Lorsque au lieu de l'œuf électrique on se sert du tube destiné à la chute des corps dans le vide, il se produit dans toute la longueur une lueur violette soumise à une espèce de mouvement ondula-

toire, accusant comme une sorte de courant dans le sens de l'électricité positive.

Dans le vide barométrique, la décharge électrique s'accompagne d'une lueur très-perceptible, quoique assez faible, que l'on peut constater par la disposition d'expérience indiquée par la figure 367 et que l'on doit à Cavendish. Un double tube barométrique plonge dans deux cuvettes à mercure; le métal de l'une d'elles est mis en communication avec la machine électrique, tandis que l'autre communique avec le sol. On voit dans ces circonstances se produire une lueur dans la chambre barométrique; cette lueur paraît d'autant plus marquée que la température est plus élevée, ce qu'il convient naturellement d'attribuer à la plus grande quantité de vapeur de mercure, dont les particules servent à la décharge.



Fig. 367. — Lueurs dans le vide barométrique.

Ces diverses expériences paraissent conduire à la conclusion suivante : La lumière électrique est toujours le résultat de la combinaison de l'électricité positive avec l'électricité négative, et l'intensité de cette lumière est d'autant plus marquée que les quantités de fluides qui se réunissent sont plus considérables. Mais pour que l'accumulation nécessaire à une grande intensité lumineuse soit possible, il est indispensable que certains corps opposent une résistance plus ou moins marquée à la réunion des fluides. Dans les gaz raréfiés, cette résistance devient de plus en plus faible, et ainsi on conçoit qu'ils facilitent la production des étincelles en même temps que celles-ci diminuent d'éclat. On est conduit ainsi à une conséquence, singulière en apparence, mais que l'expérience a pleinement vérifiée.

Si on fait le vide absolu dans un tube, aucun mouvement d'électricité et, par suite, aucune lueur ne peut se produire. L'appareil indiqué par la figure 368, qui a été construit par M. Alvergniat, permet de constater le fait. Dans le tube T on a fait le vide aussi complétement que possible à l'aide de la machine de Geissler, puis on l'a porté et maintenu quelque temps à une température voisine de celle de la fusion du verre. Il se produit sans doute dans cette circonstance une absoption des dernières particules d'air, car alors aucune étincelle ne peut plus se produire. En effet, deux fils de platine, passant à travers le tube, s'approchent à une distance de $\frac{1}{10}$ de millimètre; on met les pôles de la machine de Holtz en communication par le moyen des bornes B et B', d'une part avec ces deux fils, d'autre part avec deux tiges dont les extrémités *p* et *p'* arrivent à une petite distance l'une de l'autre dans l'air. Or, pendant tout le temps que la machine fonctionne, on voit des étincelles se produire entre ces dernières, tandis que, malgré la distance extrêmement petite qui sépare les fils de platine intérieurs, il ne se produit entre eux aucune lueur perceptible. Au lieu de ramener les fils extérieurs dans l'air à une petite distance l'un de l'autre, on peut les adapter à l'extrémité d'un tube à gaz raréfié et d'une longueur considérable; celui-ci se remplit de lueurs sur des parties d'autant plus grandes d'ailleurs que la force élastique de l'air est plus petite; on voit donc qu'à mesure que le gaz devient plus rare, la longueur de la lueur devient de plus en

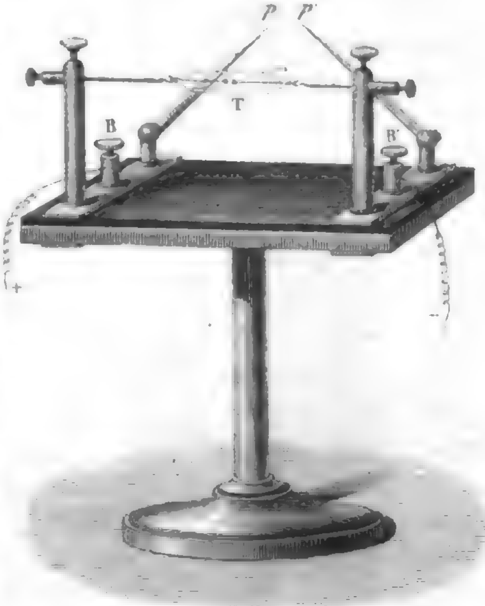


Fig. 368. — Expérience montrant que l'électricité ne passe pas dans le vide.

plus considérable pour devenir nulle lorsque la densité du gaz est nulle elle-même, ainsi que nous le disions en commençant.

439. Couleur de l'étincelle. — La couleur de l'étincelle électrique dépend de deux causes : 1° de la nature des conducteurs métalliques entre lesquels elle jaillit; 2° du milieu gazeux au sein duquel elle se produit. Lorsque l'étincelle est forte, la première influence tend à prédominer; c'est le contraire quand l'étincelle est faible. La modification qu'introduit le métal paraît due à une portion de la substance qui se vaporise; on remarque en effet, en étudiant l'étincelle au spectroscope, que le spectre présente des raies brillantes qui, ainsi que nous le verrons plus loin, se produisent exclusivement dans les sources lumineuses renfermant des vapeurs métalliques.



Fig. 369. Tube pour les gaz raréfiés.

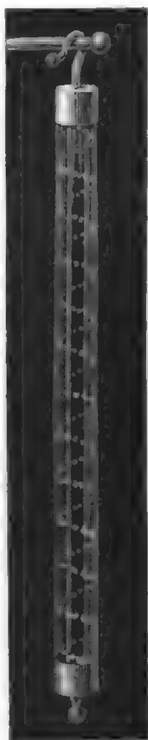


Fig. 370. Tube étincelant.

Pour étudier l'influence du milieu ambiant, on emploie des étincelles faibles, et à cet effet on opère dans des tubes contenant des gaz raréfiés (fig. 369).

Les extrémités sont traversées par des fils de platine, métal difficilement vaporisable d'ailleurs, que l'on met en communication avec les pôles de la machine de Holtz. C'est ainsi que l'on reconnaît que l'étincelle est blanche dans l'air ou l'oxygène avec une nuance de bleu, bleue dans l'azote, rouge dans l'hydrogène, verte dans l'acide carbonique, etc.

440. Multiplication de l'étincelle électrique. — Les anciens électriciens avaient imaginé un certain nombre d'appareils dans lesquels on produit des effets lumineux plus ou moins intéressants par la multiplication de l'étincelle électrique. Le principe de tous ces appareils est le même. On dispose sur une lame isolante de petits losanges en étain dont les extrémités successives sont très-rapprochées les unes des autres. Le premier losange

de la série est en communication avec une boule métallique qu'on peut approcher de la machine électrique, tandis que le dernier touche une autre boule communiquant elle-même avec le sol. Lorsque une étincelle jaillit de la machine, elle se reproduit à toutes les solutions de continuité, ce qui donne lieu à un trait lumineux instantané, d'un effet souvent assez curieux.

Dans le *tube étincelant* (fig. 370), les losanges d'étain forment une ligne en spirale autour d'un cylindre de verre qui communique avec les deux garnitures métalliques du cylindre. On met en com-



Fig. 371. — Globe étincelant.



Fig. 372. — Carreau étincelant.

munication la garniture supérieure avec la machine et la garniture inférieure avec le sol.

Lorsqu'on emploie un globe de verre au lieu d'un cylindre, l'appareil prend le nom de *globe étincelant* (fig. 371).

Dans le *carreau étincelant* (fig. 372), une languette d'étain est disposée d'une manière continue en lames parallèles, communiquant par ses deux extrémités avec deux boules placées en haut et en bas du carreau. A l'aide d'une pointe on établit sur la languette une

série de solutions de continuité dont l'ensemble peut représenter un dessin quelconque. Lors du passage de l'étincelle, un trait brillant apparaît à chacune des interruptions, d'où résulte sur le verre un dessin en traits de feu.

441. Propriétés physiologiques de l'étincelle. — Électrisation du corps humain. — Lorsqu'on approche le doigt d'une machine électrique en activité de manière à en tirer une étincelle, on éprouve une sensation d'une nature spéciale et assez difficile à décrire. C'est comme une sorte de choc douloureux dans les articulations du bras qui les fait fléchir spontanément. L'effet, tout à fait passager lorsque la machine est peu puissante, donne lieu, dans le cas contraire, à une impression pénible qui peut persister plus ou moins longtemps après le choc. Avec des machines dont le plateau a de $1^m,50$ à 2 mètres de diamètre et un système convenable de conducteurs secondaires, les étincelles peuvent devenir véritablement redoutables. Nous remarquerons à ce sujet que ce sont les machines à plateau de verre du système Ramsden qui sont seules susceptibles de produire directement de grandes étincelles. Dans la machine de Holtz il se produit comme une sorte de courant continu d'électricité à faible tension; si l'on veut avoir des étincelles véritables, il faut mettre les deux conducteurs en communication avec les armures d'un condensateur.

Dans le voisinage d'une forte machine électrique fonctionnant par un temps bien sec, on éprouve comme le sentiment d'un voile léger sur la figure, les cheveux s'impressionnent à leur base et tout le corps se trouve sous une impression spéciale due au mouvement de l'électricité développée par l'influence du conducteur. Ces phénomènes se présentent avec plus de netteté encore lorsqu'on monte sur le tabouret isolant et qu'on place la main sur le conducteur. La personne qui fait cette expérience devient ainsi une dépendance ou un prolongement du conducteur lui-même, elle s'électrise, ses cheveux se hérissent et deviennent lumineux dans l'obscurité. Si on approche d'elle un corps conducteur, les cheveux retombent à chaque étincelle produite pour se relever immédiatement après.

On a essayé autrefois d'introduire ces effets spéciaux de l'électricité dans la thérapeutique médicale. On a successivement em-

ployé la machine électrique et la bouteille de Leyde. Ces deux modes sont à peu près abandonnés aujourd'hui, et les médecins qui se servent de l'électricité utilisent exclusivement les courants électriques obtenus par les méthodes qui seront décrites dans la suite de cet ouvrage.

442. Propriétés mécaniques et physiques de l'étincelle. — L'étincelle électrique produit un ébranlement mécanique très-intense dans le milieu où elle se produit. On le démontre très-clairement à l'aide du thermomètre de Kinnersley (fig. 373). Il se compose de deux tubes de verre d'inégal diamètre; le plus large est complétement fermé; quant à l'autre, il communique avec l'air. La partie supérieure du large tube est traversée par une tige métallique terminée en boule, qui peut se placer à une distance variable d'une autre boule communiquant avec la garniture inférieure de l'appareil. On place dans l'instrument un liquide assez mobile, de l'alcool par exemple, de façon que son niveau atteigne à peine la boule inférieure. Au moment où l'étincelle jaillit à l'intérieur, le liquide est projeté avec une grande violence, et peut s'élever à une hauteur de plusieurs mètres si l'étincelle est suffisamment forte.



Fig. 373.
Thermomètre de Kinnersley.



Fig. 374. — Mortier électrique.

La même propriété de l'étincelle se manifeste dans l'expérience du mortier électrique (fig.374); la figure dispense de toute explication.

L'étincelle peut se produire dans l'intérieur d'un liquide mauvais conducteur qu'elle ébranle d'une façon analogue ; si le liquide

est renfermé dans un vase clos, celui-ci peut être brisé. Elle peut jaillir aussi à travers des corps mauvais conducteurs façonnés en lames; il y a dans ce cas perforation de la lame; mais il faut, pour ce genre d'expériences, des charges électriques très-fortes, qu'on n'obtient facilement qu'avec les appareils qui seront décrits dans le chapitre suivant.

L'ébranlement moléculaire produit par l'étincelle doit inévitablement amener une élévation de température. On peut facilement déterminer l'inflammation de l'éther en approchant du conducteur de la machine électrique un vase présentant en son milieu une petite boule faisant très-légèrement saillie au-dessus du liquide; au moment où l'étincelle atteint la boule, l'éther s'enflamme. Avec des décharges plus fortes, on peut enflammer des matières moins combustibles que l'éther. C'est à l'élévation de température exclusivement que Kinnersley attribuait le mouvement du liquide dans son appareil; de là le nom qu'il lui donna et qui a été conservé. Ce n'est pas évidemment dans les corps mauvais conducteurs seuls que se produit un ébranlement moléculaire au moment de l'étincelle : un phénomène tout à fait analogue doit se rencontrer dans les corps conducteurs, et nous en avons vu la preuve dans l'influence que la nature du métal exerce sur la couleur de l'étincelle. On pourrait d'ailleurs constater directement le fait en tirant d'une puissante machine électrique une étincelle à l'aide d'un conducteur en communication avec le sol, mais présentant sur son parcours un fil métallique très-mince; celui-ci, au moment de la décharge, peut s'échauffer jusqu'à rougir.

443. Propriétés chimiques de l'étincelle. — L'étincelle électrique donne lieu à des phénomènes chimiques fort importants. Ainsi, quand elle se produit dans le mélange explosif de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène, elle détermine la combinaison des deux gaz. L'expérience se fait ordinairement dans le pistolet de Volta. C'est un vase en métal contenant le mélange et fermé par un bouchon. La paroi est traversée par une tige métallique isolée, terminée à l'extérieur et à l'intérieur par une boule; cette dernière se trouve à une petite distance de la paroi, si bien que, si on produit à l'extérieur une étincelle, celle-ci se reproduit à

l'intérieur et donne lieu à l'inflammation du mélange. Ce phénomène s'accompagne d'une violente détonation qui projette le bouchon au loin, circonstances qui expliquent le nom donné par son auteur à l'instrument.

L'étincelle électrique produit souvent un effet inverse, c'est-à-



Fig. 375. — Pistolet de Volta.

dire la décomposition d'un corps composé; mais le phénomène ici n'a lieu que peu à peu, et il faut, pour qu'il atteigne sa limite d'action, un grand nombre d'étincelles successives. Ainsi, en faisant passer au sein du gaz ammoniac une série prolongée d'étincelles électriques, on voit le volume du gaz augmenter graduellement; au bout d'un certain temps, ce volume est devenu exactement double de ce qu'il était, et on reconnaît qu'alors il est formé d'un mélange d'azote et d'hydrogène, qui sont les éléments constitutifs de l'ammoniaque.

Souvent ces deux phénomènes se produisent simultanément. Ainsi, qu'on fasse passer une étincelle dans un mélange d'hydrogène carboné et d'une quantité convenable d'oxygène, l'hydrogène carboné se décompose, son hydrogène se combine avec une partie de

l'oxygène pour former de l'eau, son carbone se combine aussi avec l'oxygène et donne de l'acide carbonique. On conçoit quelles précieuses ressources doivent fournir à la chimie analytique ces réactions exécutées dans des vases appropriés, nommés *eudiomètres*.

444. Vent et tourniquet électriques. — Si l'on fixe sur le conducteur de la machine électrique une tige métallique recourbée et terminée en pointe (fig. 376), l'électricité s'écoule par la pointe

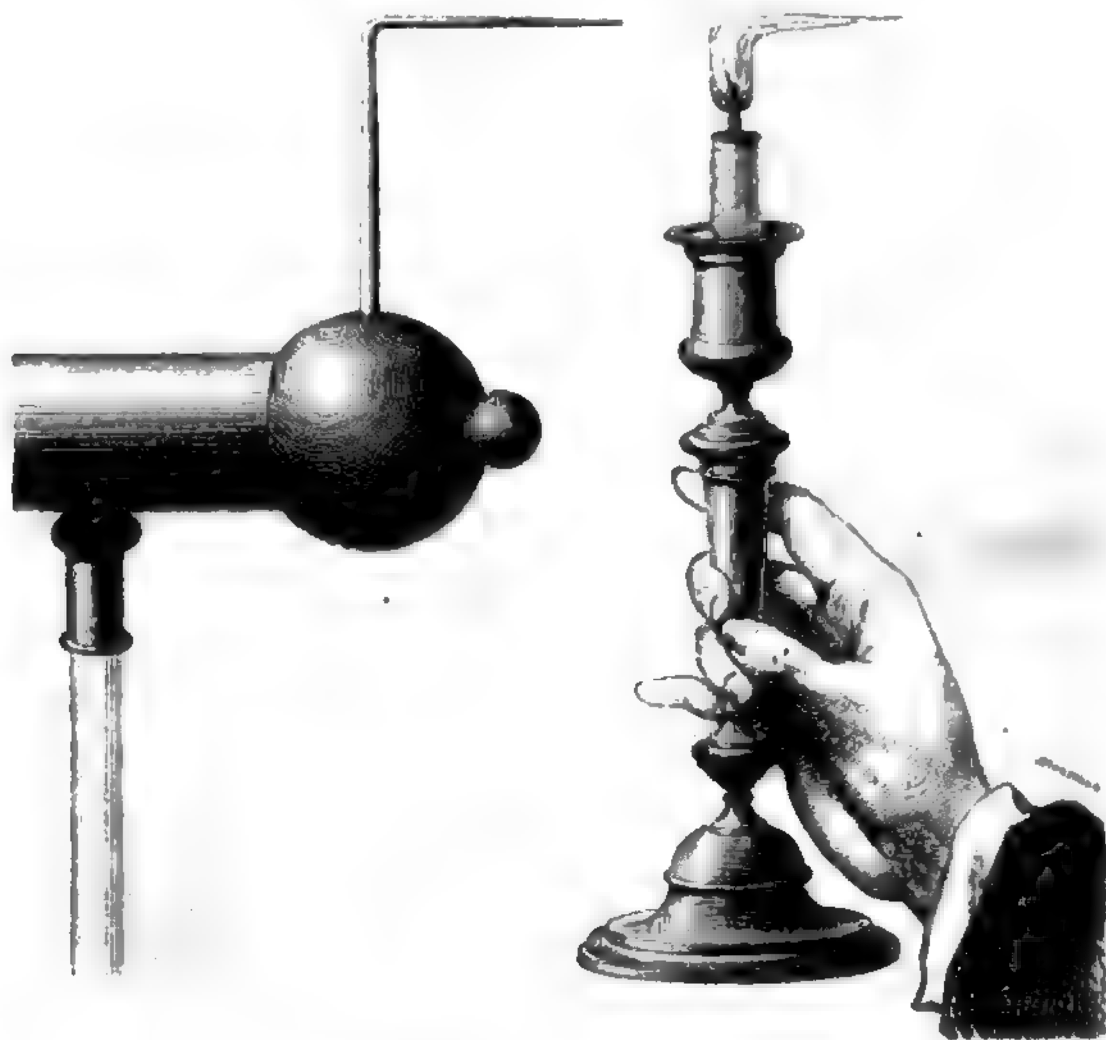


Fig. 376. — Vent électrique.

qui dans l'obscurité présente une aigrette lumineuse. Les couches d'air voisines s'électrisent par communication et sont ensuite repoussées par la tige. De nouvelles couches viennent remplacer les premières, de sorte qu'il se produit un mouvement de l'air très-perceptible à la main, et qui peut être assez intense pour courber ou même éteindre la flamme d'une bougie placée au-devant de la pointe.

Le tourniquet électrique est formé (fig. 377) de tiges de même longueur, fixées à une petite chape centrale par l'une de leurs extrémités et recourbées à l'autre en pointe et dans le même sens. Si l'on place la chape centrale sur un pivot fixé à la machine électrique, comme le montre la figure, on voit le système entrer en mouvement en sens contraire de la direction des pointes. Cet effet

est dû à l'action répulsive des couches d'air électrisées sur les pointes mobiles; en approchant la main on sent très-distinctement le courant d'air produit à chacune des pointes, et dans l'obscurité on aperçoit l'aigrette qui les termine.

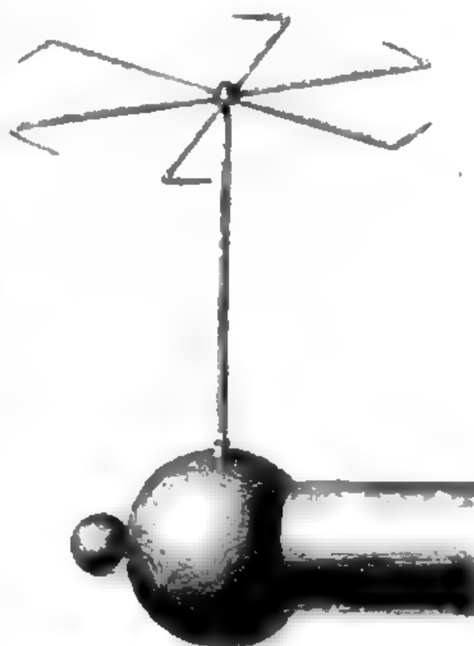


Fig. 377. — Tourniquet électrique.

Pour que l'expérience réussisse, il faut que le renouvellement de l'air puisse se faire continuellement autour des pointes; s'il n'en était pas ainsi, l'appareil demeurerait immobile. Aussi, si l'on dispose le tourniquet sur un support spécial en dehors de la machine, et qu'on le recouvre d'une cloche de verre enduite d'un vernis isolant, le mouvement s'arrêtera au bout de peu d'instants, lorsque la masse d'air intérieure sera arrivée à un état d'électrisation permanente.

445. Arrosoir électrique. — On suspend à la machine électrique un vase contenant un liquide et muni d'ajutages capillaires. Lorsque l'appareil n'est pas électrisé, le liquide s'écoule goutte à goutte; mais lorsqu'on tourne le plateau de la machine, on voit se former à l'extrémité des ajutages un filet lumineux continu de liquide. On a remarqué que dans les deux cas la dépense est la même. Ce résultat était facile à prévoir, car les actions mutuelles qui s'exercent entre les molécules, en vertu de leur électrisation, ne sauraient modifier l'effet propre de la pesanteur, et par suite la dépense.



Fig. 378. Arrosoir électrique.

CHAPITRE XL.

CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

446. Condensateurs. — On désigne sous le nom de *condensateurs* des appareils dans lesquels on parvient à accumuler de l'électricité en quantité plus considérable que celle que l'on aurait obtenue par la simple communication avec la machine électrique. Un condensateur est essentiellement formé de deux plateaux conducteurs A et B (fig. 379) séparés par une lame isolante C. On met en communication l'un des plateaux A avec la machine électrique, tandis que le plateau B communique avec le sol : dans ces circonstances le plateau A, qu'on désigne sous le nom de *plateau collecteur*, se charge d'électricité positive, et le plateau B, appelé *plateau condensateur*, se charge d'électricité négative. De plus, la quantité d'électricité de A est supérieure à celle dont il se serait chargé si on l'eût simplement mis en communication avec la machine électrique. En effet, dans ce cas le fluide se serait répandu sur le conducteur et le plateau, conformément aux lois mécaniques de sa distribution, et il se serait produit un état d'équilibre dans lequel les molécules voisines du plateau auraient éprouvé de la part des molécules environnantes des actions égales et contraires. Supposons qu'alors on approche le plateau B, son électricité naturelle sera décom-

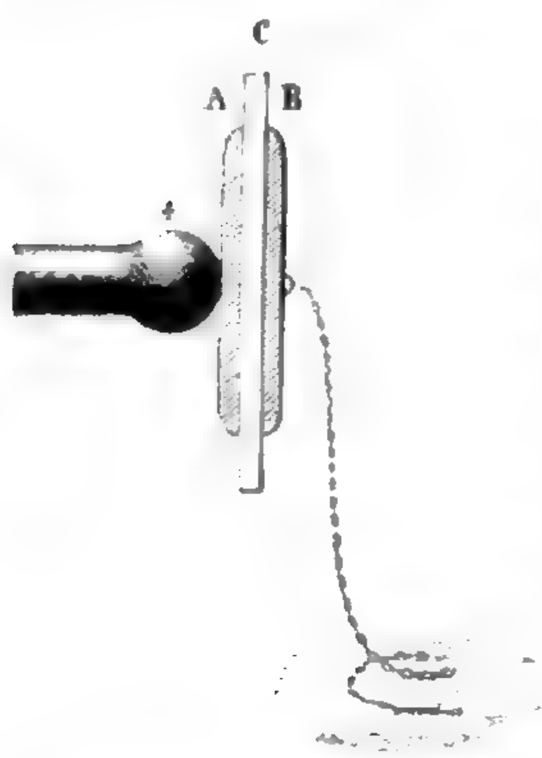


Fig. 379. — Condensateur théorique.

posée en électricité positive qui s'écoulera dans le sol et en électricité négative qui sera attirée à la partie antérieure du plateau. Celle-ci agissant par voie d'attraction sur le fluide de la machine, on voit que l'équilibre sera rompu et qu'une nouvelle quantité d'électricité positive pénétrera dans le plateau A. Cette nouvelle quantité d'électricité produisant une nouvelle décomposition par influence, le même phénomène se reproduira successivement et, par suite, il y aura accumulation d'électricité positive dans le plateau A et d'électricité négative dans le plateau B. Le nom de condensateur est donc justifié.

Cette accumulation d'électricité a d'ailleurs une limite, car pour une quantité d'électricité positive quelconque qui entre dans le plateau A, il se produit dans B une quantité d'électricité négative moindre. La force répulsive croît donc plus rapidement que la force attractive, et il se produira nécessairement un nouvel éta d'équilibre. On dit alors que le condensateur est chargé. D'ailleurs, l'accumulation continuant, il arriverait un moment où les deux fluides, en vertu de leur attraction mutuelle, se réuniraient en perçant ou contournant la lame isolante. Il importe d'éviter que ce phénomène se produise dans les appareils : il faut pour cela donner à la lame isolante une étendue ou une épaisseur en rapport avec la puissance de la source électrique que l'on emploie.

Lorsque le condensateur est chargé, les deux fluides ne sont pas distribués de la même manière sur les deux plateaux. En effet, le plateau B communiquant avec le sol, il n'y a pas de fluide répandu sur sa face postérieure qu'on peut considérer comme à l'état naturel, aussi en le touchant avec un plan d'épreuve on n'emporte pas d'électricité. Le plateau A, au contraire, étant en communication avec la machine, présente sur sa surface une couche électrique en continuité avec celle des conducteurs. On peut même admettre, si les dimensions du plateau collecteur ne sont pas considérables, que la charge des conducteurs n'est point modifiée par leur communication avec le condensateur. On remarque, en effet, que le pendule de l'électromètre à cadran s'écarte dans les deux cas de la même quantité.

Si, à l'aide d'un conducteur formé de deux branches à charnière muni de manches de verre et terminé par les boules M et N

(fig. 380), on réunit le plateau A et le plateau B, il se produit une brillante étincelle provenant de la combinaison des électricités positive et négative accumulées dans les deux plateaux, et le condensateur se trouve déchargé. Lorsque le condensateur ne renferme

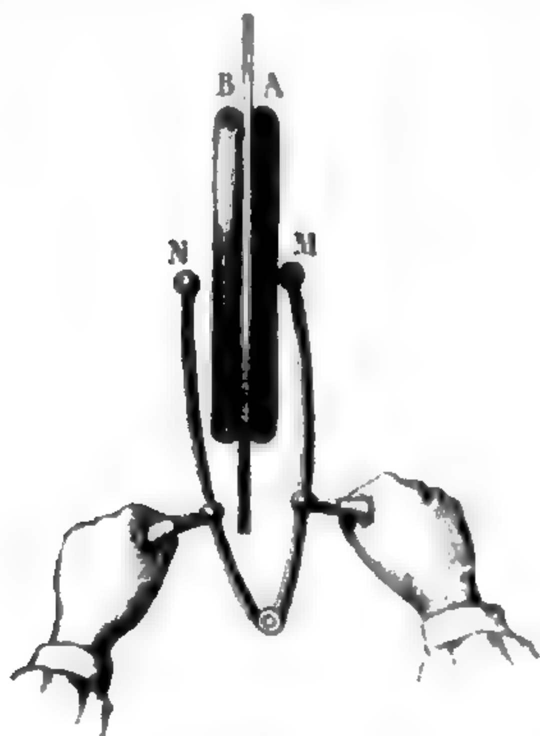


Fig. 380. — Décharge du condensateur.



Fig. 381. — Excitateur simple.

qu'une petite quantité d'électricité, il n'est pas besoin d'employer l'appareil précédent, appelé *excitateur à manches de verre;* on peut se servir de l'excitateur simple (fig. 381), formé d'un arc métallique à charnière servant à réunir les deux plateaux. L'expérience prouve, en effet, que le mouvement des fluides électriques se fait surtout dans les systèmes conducteurs, de sorte que le corps de l'expérimentateur reste en dehors du phénomène. Mais si on venait à réunir les deux plateaux à l'aide des mains, c'est par le corps même que se ferait la réunion des fluides et il en résulterait une commotion très-vive.

447. Découverte de Cuneus. — C'est à l'observation d'une commotion de ce genre qu'est due la découverte de la bouteille de Leyde, l'un des instruments les plus connus de l'électricité. Dans le courant de l'année 1746, Cuneus, élève de Muschenbroeck, célèbre physicien de Leyde, voulant électriser de l'eau, se servait, en le tenant à la main, d'un flacon à large goulot (fig. 382) dans lequel pénétrait une chaîne en communication avec le conducteur de la machine électrique. Lorsque l'expérience eut duré quelque temps, il voulut, pour abandonner l'eau à elle-même, retirer la chaîne conductrice;

il éprouva, au moment du contact, une commotion qui l'épouvanta au plus haut degré et lui fit abandonner le flacon qui alla se briser sur le sol. Muschenbroeck ayant répété l'expérience en fut plus vivement impressionné encore : il lui fallut deux jours pour se remettre

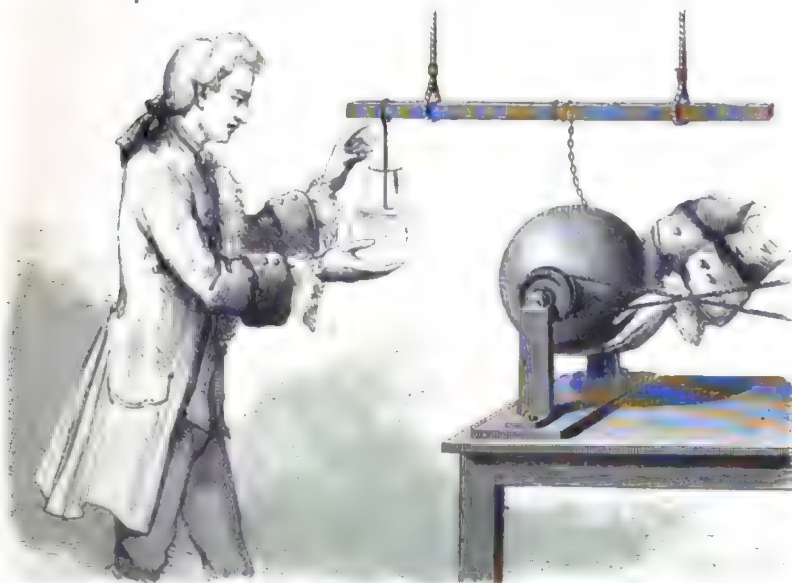


Fig. 382. — Expérience de Cuneus.

de son effroi, et il écrivait à Réaumur que pour la couronne de France il ne voudrait pas s'exposer à une seconde commotion. La nouvelle de cette expérience extraordinaire se répandit en Europe avec la rapidité de l'éclair, tous les physiciens la répétèrent à l'envi, l'appareil destiné à la produire fut successivement modifié et amélioré ; il constitue aujourd'hui ce que l'on appelle la *bouteille de Leyde*. Il est aisé de voir d'ailleurs qu'il y a dans l'expérience de Cuneus un véritable phénomène de condensation : en effet, le liquide contenu dans l'intérieur de la bouteille correspond au plateau collecteur, la main joue le rôle du plateau condensateur et la lame isolante est formée par la substance même du flacon. Au moment où l'expérimentateur enlève la chaîne, il établit lui-même une communication entre les électricités des deux systèmes conducteurs, et leur réunion produit la commotion observée.

448. Bouteille de Leyde. — La bouteille de Leyde, telle qu'on la construit aujourd'hui, se compose d'un flacon recouvert à l'extérieur d'une feuille métallique (fig. 383) qui s'élève jusqu'à une petite distance de la naissance du goulot. L'intérieur est rempli de feuilles conductrices en contact avec une tige métallique qui traverse le bouchon et se termine extérieurement par une boule. Comme le



Fig. 383.
Charge de la bouteille de Leyde.



Fig. 384.
Décharge de la bouteille de Leyde.

verre est assez hygrométrique, on recouvre ordinairement d'une couche de cire ou de vernis isolant le goulot et le flacon jusqu'à l'origine de la feuille extérieure. La bouteille de Leyde forme, comme on voit, un condensateur; la feuille de métal qui est à l'extérieur se nomme l'*armature extérieure;* la tige et les feuilles en communication avec elle forment l'*armature intérieure.* Si l'on fait communiquer l'armature intérieure avec la machine électrique et l'armature extérieure avec le sol, la première se charge d'électricité positive et la seconde d'électricité négative. En les réunissant ensemble par un arc métallique, comme le montre la figure 384, il se produit

une étincelle dont l'intensité est en rapport avec le degré de charge et les dimensions de l'appareil.

449. Décharges secondaires. — Lorsque l'on a déjà réuni les deux armatures d'une bouteille de Leyde, on peut obtenir encore une petite étincelle en les réunissant de nouveau et cela un certain nombre de fois; c'est ce que l'on appelle les décharges secondaires. Leur origine s'explique facilement. Il résulte, en effet, de la théorie que la quantité d'électricité du plateau collecteur surpasse celle du plateau condensateur. Il reste donc, après la première décharge, une certaine quantité d'électricité sur le premier plateau. Celle-ci détermine la production d'électricité contraire sur le second plateau, mais toujours en quantité moindre qu'elle-même; on devra donc obtenir une seconde étincelle qui, théoriquement, devrait être suivie d'une infinité d'autres; mais comme en réalité elles diminuent rapidement d'intensité, au bout de peu de temps elles cessent d'être perceptibles.

Le phénomène dont il s'agit a d'ailleurs une autre cause. En effet, les électricités de nom contraire, s'attirant à travers la lame isolante, doivent se porter, au moins pour la plus grande partie, sur les deux faces de cette lame et même pénétrer à une certaine profondeur dans l'intérieur. Or, au moment de la décharge, le défaut de conductibilité de la lame oppose aux mouvements des fluides une certaine résistance qui empêche leur neutralisation complète. Il se produit ainsi successivement une nouvelle disposition de l'électricité, qui donne lieu aux diverses décharges que l'on observe et qui peuvent, quoique fort peu intenses, être très-nombreuses.

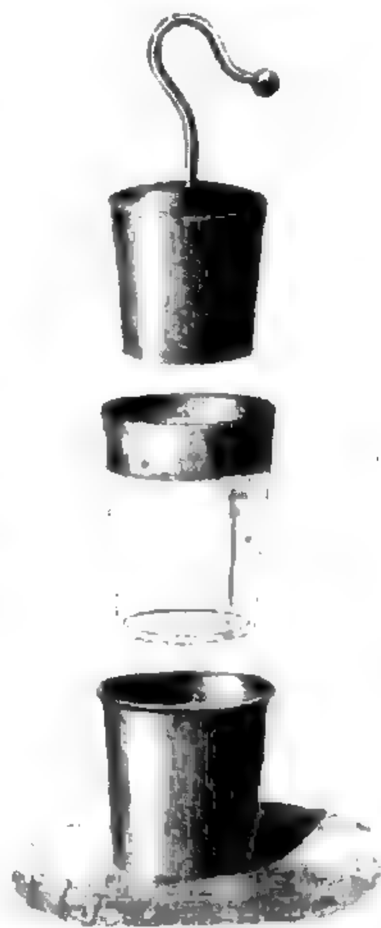


Fig. 385. — Bouteille de Franklin.

On vérifie directement que l'électricité du condensateur réside principalement sur la lame isolante en se servant de la bouteille à armatures mobiles (fig. 385) imaginée par Franklin. Après avoir chargé la bouteille à la manière ordinaire, on la pose sur un isoloir; on enlève avec un crochet de verre l'armature intérieure que l'on touche

pour la mettre à l'état naturel. On touche aussi l'armature extérieure après avoir enlevé la lame isolante et on assemble de nouveau la bouteille, qui fournit une étincelle à peu près aussi vive que celle qu'elle aurait donnée directement.

450. Décharge successive du condensateur. — Au lieu de décharger instantanément la bouteille en réunissant les deux armatures, on peut procéder par contacts alternatifs. A cet effet, après l'avoir chargée, on la place sur un isoloir et on touche l'armature intérieure. Il se produit alors une petite étincelle due à l'écoulement d'une partie de l'électricité positive dans le sol. Mais, par suite de cet écoulement, une partie de l'électricité négative qui était retenue en totalité à la surface de la lame isolante se répand sur la surface de l'armature extérieure, et on peut en tirer une étincelle. C'est alors une portion du fluide positif qui se répand sur l'armature intérieure d'où l'on peut tirer une étincelle et ainsi de suite. Il est évident d'ailleurs que, à chaque contact, on n'enlève qu'une *fraction* de l'électricité que contient l'armature. Il faudrait donc théoriquement, pour opérer la décharge complète, un nombre de contacts indéfini; mais comme, en réalité, l'électricité se perd par l'air en même temps que se produit l'opération précédente, il arrive toujours qu'au bout de peu de temps l'appareil a perdu la totalité de son électricité.



Fig. 386. — Décharge alternative.

La décharge par contacts alternatifs peut se faire à l'aide de la bouteille à carillon (fig. 386). L'armature intérieure se termine par un timbre, et l'armature extérieure communique par le moyen d'une languette d'étain avec un autre timbre supporté par une colonne métallique. Entre les

deux timbres se trouve suspendu une balle métallique isolée; celle-ci, attirée d'abord par l'armature intérieure et repoussée ensuite, vient au contact du second timbre perdre l'électricité positive qu'elle possédait et s'électriser négativement. Elle est de nouveau attirée par le timbre de l'armature intérieure et ainsi de suite.

451. Pouvoir condensant. — On appelle pouvoir condensant d'un condensateur le rapport qui existe entre la quantité *totale* d'électricité que prend le plateau collecteur et celle qu'il eût prise s'il eût été simplement mis en communication avec la machine électrique. Ce rapport caractérise l'effet propre de l'appareil, et il est très-important au point de vue théorique de rechercher les diverses circonstances qui peuvent en modifier la valeur dans un sens ou dans un autre. Au fond, le calcul de ce pouvoir est un cas particulier de la théorie générale de la distribution des fluides; il doit donc dépendre de la forme du condensateur, de l'étendue des plateaux, de leur mode de communication soit avec la machine, soit avec le sol, etc.

Pour étudier l'influence de ces diverses conditions physiques,

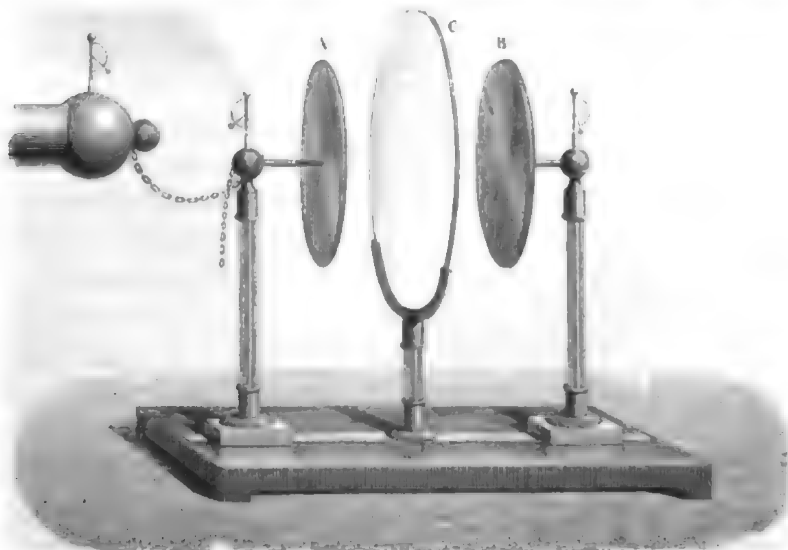


Fig. 387. — Condensateur d'Æpinus.

on peut employer avec avantage le condensateur analogue à celui d'Æpinus, formé, comme le montre la figure 387, de deux plateaux

métalliques A et B, portés par des pieds isolants, et séparés par un disque de verre C. Le support général de l'appareil présente une rainure qui permet de rapprocher ou d'éloigner les plateaux métalliques l'un de l'autre. Pour charger l'appareil, on fait communiquer le plateau A avec la machine, en même temps qu'on touche B pour le mettre en communication avec le sol.

452. Expériences de M. Riess. — C'est un appareil de ce genre qu'employait M. Riess dans un travail fort important sur le sujet qui nous occupe. Pour mesurer le pouvoir condensant, il observait, à l'aide du plan d'épreuve et de la balance de Coulomb, la tension électrique sur la face antérieure du plateau collecteur, d'abord quand il était seul, puis quand on approchait le plateau condensateur en communication avec le sol; le rapport ainsi obtenu, et que M. Riess appelle force condensante, ne diffère que peu en général du pouvoir condensant tel que nous l'avons défini.

Les tensions doivent d'ailleurs évidemment être mesurées sur le même point du plateau collecteur dans les deux expériences. M. Riess est arrivé ainsi à quelques résultats importants.

1° La force condensante est, toutes choses égales d'ailleurs, indépendante de la charge absolue des plateaux.

2° Elle dépend essentiellement de la distance, et augmente quand celle-ci diminue, à peu près en raison inverse.

3° La mesure du pouvoir condensant, dans une même expérience, ne donne pas les mêmes résultats, suivant que l'on touche la boule qui est en communication avec le centre du plateau, ou les bords du plateau lui-même. Dans le premier cas, le pouvoir condensant est sensiblement plus fort. Il paraît donc que la distribution caractéristique du phénomène de la condensation est moins marquée sur les bords que dans les parties centrales des plateaux; d'où il suit que plus le plateau sera grand, moins l'effet de cette action contraire des bords sera marquée, car la surface d'un disque circulaire varie plus rapidement que son contour. L'expérience montre en effet que le pouvoir condensant augmente avec l'étendue des plateaux.

4° Le mode de communication avec la machine a aussi une influence sur le pouvoir condensant. Ainsi, M. Riess a constaté que

dans son appareil il y avait avantage à faire arriver l'électricité sur le plateau collecteur par un fil perpendiculaire à sa surface. Il est d'ailleurs évident, sans même qu'il soit nécessaire de faire à cet égard des expériences précises, que le pouvoir condensant varie avec la forme des systèmes conducteurs; ainsi, il est plus grand avec des plateaux qu'avec des sphères.

453. Influence de la lame isolante. — Les expériences de M. Riess ne portent que sur le problème propre de la distribution dans le système conducteur, mais la condensation dépend aussi de la nature de la lame isolante. Ce fait très-important est mis en évidence par l'expérience suivante : Un disque métallique A (fig. 388) est isolé et électrisé; près de ce disque, à la même distance, sont placés deux autres disques métalliques B et C, également isolés et munis sur leur face postérieure d'un petit pendule électrique. Pendant que s'exerce l'influence du plateau A, que nous supposerons électrisé positivement, on met B et C en communication avec le sol, le fluide positif disparaît et les deux plateaux B et C restent électrisés négativement. Toutefois le fluide négatif se trouve exclusivement sur la partie intérieure des plateaux, et les pendules sont dans la verticale. Si dans ces circonstances on approche B de A, on voit les deux pendules diverger et on reconnaît, à l'aide d'un plan d'épreuve et d'un électroscope, que l'électricité de la face postérieure de B est positive, tandis que celle de C est négative.

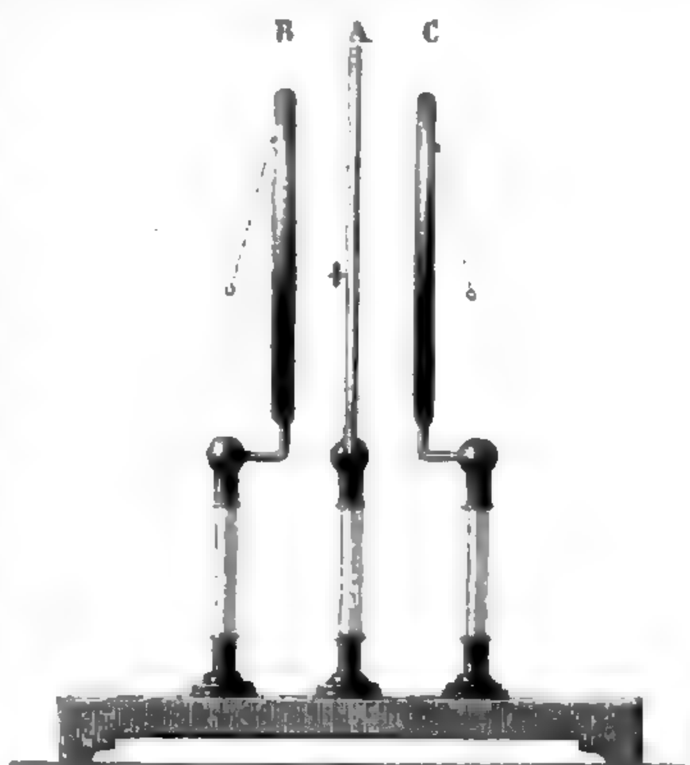


Fig. 388.

Ce double résultat est une conséquence naturelle de la décomposition par influence. En effet, B se rapprochant de A éprouve une nouvelle induction, et du fluide positif est repoussé sur la face opposée à A; en même temps, le fluide négatif ayant augmenté attire une plus grande quantité du fluide positif de A du côté qui lui fait face; il en résulte une diminution sensible d'attraction

sur le fluide négatif du plateau C, de sorte qu'une petite partie devient libre sur la surface postérieure du plateau. Si actuellement on suppose les choses dans leur état initial, les plateaux B et C étant à la même distance de A, les pendules dans la verticale, et qu'entre B et A on interpose une lame isolante de soufre ou de résine, on produit le même effet que si on avait rapproché B de A. De là résulte cette conséquence importante, que la substitution d'une lame de soufre ou de résine à une lame d'air augmente l'action par influence, comme si la distance avait diminué. On voit donc que les corps isolants n'agissent pas seulement d'une manière passive; ils ont un pouvoir inducteur propre, et par conséquent leur influence s'exerce d'une manière directe sur les phénomènes de la condensation.

454. Pouvoir inducteur spécifique. — Faraday, à qui sont dues les observations précédentes, a cherché à mesurer pour les différents corps isolants la valeur du pouvoir inducteur spécifique. Il se servait dans ce but d'une sorte de bouteille de Leyde, formée d'une sphère métallique A (fig. 389) en communication avec la tige M, et formant avec elle l'armature intérieure. L'armure extérieure est constituée par la sphère B, formée d'ailleurs de deux parties qui peuvent s'ajuster l'une à l'autre. L'intervalle entre les deux sphères peut être rempli soit avec une matière isolante solide, soit avec différents gaz que l'on introduit par le moyen du robinet R. Pour faire comprendre la méthode employée par Faraday, nous prendrons les nombres obtenus dans une de ses expériences. L'appareil renfermant de l'air comme substance isolante, on le charge, et en mesurant à la balance de torsion la charge du bouton M, on la trouve égale à 250°. Si on fait communiquer M avec le bouton d'un appareil tout à fait identique, les charges se distribuent naturellement par parties égales et on trouve en effet sur chacun des boutons deux charges peu éloignées de 125°.

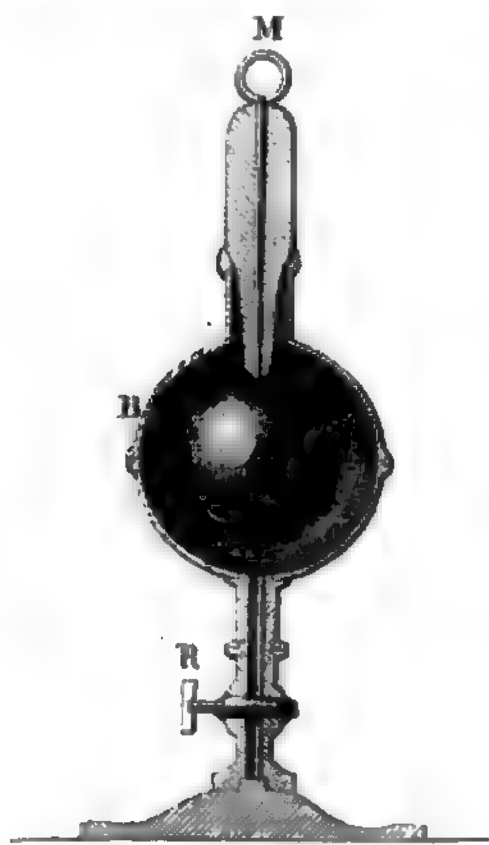


Fig. 389. — Mesure du pouvoir inducteur spécifique.

Après cela, on fait une nouvelle expérience dans les conditions suivantes : La bouteille à air étant chargée et le bouton accusant une tension de 290°, on le met en contact avec le bouton d'un appareil analogue, mais à résine, et on trouve que chacun d'eux possède, après la communication, une charge de 114°. Or, si l'électricité qui manque à l'appareil primitivement chargé se trouvait dans un appareil analogue, il devrait accuser une charge de 290 — 114 = 176° ; si la charge n'est que de 114°, c'est que la condensation est plus complète, c'est-à-dire que la résine a un pouvoir inducteur plus grand. On conçoit qu'on puisse qualifier ces pouvoirs inducteurs en les considérant comme inversement proportionnels aux charges libres des armatures obtenues par la même quantité d'électricité. Dans le cas actuel, on pourra donc, en désignant par x le pouvoir inducteur de la résine par rapport à celui de l'air, poser la relation $\frac{1}{x} = \frac{114}{176}$, d'où $x = \frac{176}{114} = 1{,}54$.

En appliquant ce mode d'expérimentation à diverses substances isolantes, on a trouvé pour les pouvoirs inducteurs spécifiques les nombres suivants :

Air.	1,00	Poix.	1,80
Blanc de baleine. . . .	1,45	Cire.	1,86
Verre.	1,76	Gomme laque.	2,00
Résine.	1,77	Soufre.	2,24

455. Polarisation des diélectriques. — Les milieux isolants ou diélectriques ne se trouvant pas pendant l'induction dans cet état passif que l'on admettait avant les expériences de Faraday, et ayant au contraire une action propre, il est évident que cette action doit correspondre à une modification particulière éprouvée par eux. Suivant Faraday, cette modification consisterait dans une sorte de polarisation des molécules, qui, agissant successivement l'une sur l'autre par influence, se constitueraient dans deux états électriques opposés sur leurs deux moitiés, de façon que les extrémités contraires se regardent. Cette polarisation se maintient plus ou moins longtemps dans les diélectriques à raison de la difficulté qu'éprouvent les fluides à se mouvoir ; mais on doit admettre qu'elle se produit toujours et qu'elle constitue le fait général de l'induction élec-

trostatique. Dans les corps conducteurs toutefois elle est, pour ainsi dire, instantanée, les recompositions ont lieu entre chaque molécule et c'est seulement à la surface que se manifestent les électricités contraires.

La polarisation des diélectriques se manifeste clairement dans l'expérience suivante. Dans un vase en verre (fig. 390), on verse de l'essence de térébenthine dans laquelle on a placé des filaments de soie de 2 ou 3 millimètres de longueur. Deux tiges métalli-



Fig. 390. — Polarisation des diélectriques.

ques A et B, terminées en pointe à l'intérieur, sont mises en communication l'une avec le sol, l'autre avec la machine électrique. Aussitôt que cette dernière est mise en activité, on voit, comme le montre la figure, les petits filaments se placer en file à la suite les uns des autres et persister dans cette position avec assez de force, comme on peut s'en assurer en essayant de rompre la file à l'aide d'un tube de verre. Dès qu'on arrête l'action de la machine, les filaments retombent instantanément au fond du vase.

Une expérience de M. Matteucci démontre cette polarisation d'une manière plus directe encore. On forme une sorte de pile de lames de mica que l'on presse fortement les unes contre les autres et qu'on termine par deux armures métalliques. On charge cette espèce de condensateur à la manière ordinaire, et après avoir enlevé les armures avec des manches isolants, on trouve que toutes les lames sont polarisées, la face tournée vers l'armure positive étant positive et la face opposée étant négative.

456. Direction de la ligne d'influence. — Il suit de ces diverses observations que l'influence n'est point une sorte d'action à distance, dont la nature serait d'ailleurs assez incompréhensible; c'est une propagation de mouvement par l'intermédiaire des molécules diélectriques. Cette propagation n'est pas nécessai-

rement rectiligne, elle peut dans certaines circonstances se faire d'un façon curviligne, ainsi que l'a montré directement M. Faraday. Cela se rencontrera particulièrement lorsque en regard du corps électrisé on placera un corps conducteur qu'on aura mis un instant en communication avec le sol. Le fluide repoussé ayant ainsi disparu, il en résultera un obstacle à la propagation, et si l'influence se produit au delà du corps conducteur, ce sera suivant des lignes courbes qui le contournent.

On peut d'ailleurs constater directement par l'expérience que, si entre un corps électrisé et un corps conducteur isolé, soumis à son influence, on interpose un plateau conducteur en communication avec le sol et *suffisamment large,* toute trace d'électricité libre disparaît dans le corps influencé, qui retombe à l'état neutre. *L'induction ne peut donc s'exercer à travers les corps conducteurs en communication avec le sol.*

457. Formule du pouvoir condensant. — On voit par tout ce qui précède que le pouvoir condensant dépend d'une foule d'éléments et que dès lors on ne saurait en donner une expression applicable à tous les cas. Toutefois on peut utilement se servir d'une formule indiquée par Biot et qu'on peut ordinairement considérer comme assez approchée. Soit, au moment de l'équilibre, A la quantité totale d'électricité du plateau collecteur, B celle du plateau condensateur, on aura, en désignant par m une quantité plus petite que l'unité, $B = mA$. Si on touche le plateau collecteur, il s'échappera une portion d'électricité, qu'on peut considérer comme égale à celle α qu'aurait donnée la communication pure et simple avec la machine. L'électricité du plateau condensateur sera supérieure alors à celle du plateau collecteur ; de plus, si les deux plateaux sont identiques, comme leur distance n'a pas varié, le rapport des deux quantités d'électricité sera encore exprimé par m. On aura donc

$$A - \alpha = mB = m^2A, \text{ d'où } \frac{A}{\alpha} = \frac{1}{1 - m^2}. \qquad (a)$$

Dans cette formule la quantité m dépend évidemment de tous les éléments qui influent sur la condensation. Mais dans le cas de condensateurs de même forme et avec une lame isolante de même

nature, elle dépend surtout de la distance; sa valeur approche d'autant plus de l'unité que cette distance est plus petite. Si on suppose, par exemple, $m = \frac{9}{10}$, la formule donne

$$\frac{A}{\alpha} = \frac{1}{1 - \frac{81}{100}} = \frac{100}{100 - 81} = 5,2.$$

Ce qui veut dire que le plateau collecteur du condensateur renferme cinq fois plus d'électricité qu'il n'en eût reçu directement par sa communication avec la machine électrique.

458. Détermination de m. — On voit donc que, pour connaître le pouvoir condensant, il suffit de mesurer la quantité m. A cet effet on isole le condensateur, et à l'aide du plan d'épreuve et de la balance de torsion on mesure la charge de l'armature intérieure: cette charge est proportionnelle à α et par suite, d'après la formule (a), à $A(1 - m^2)$. On touche alors l'armature intérieure, il s'échappe une quantité d'électricité sensiblement égale à α, d'où résulte sur l'armature extérieure une quantité d'électricité libre $\beta = B(1 - m^2)$. Cette électricité étant de nature contraire à celle de l'armature intérieure, la mesure comparative de sa tension présenterait des difficultés. Pour opérer sur de l'électricité de même nature, on touche encore l'armature extérieure, il se produit alors sur l'armature intérieure une quantité d'électricité libre α' égale à $A'(1 - m^2)$, en désignant par A' la charge totale de l'armature. Or

$$A' = A - \alpha = A - A(1 - m^2) = Am^2,$$

d'où

$$\alpha' = Am^2(1 - m^2) \quad \frac{\alpha'}{\alpha} = m^2.$$

On voit donc qu'en prenant le rapport des charges α' et α, on obtiendra comme quotient la quantité m^2.

459. Diverses sortes de condensateurs. — Le pouvoir condensant est évidemment d'autant plus grand que la quantité m est plus voisine de l'unité, c'est-à-dire que la lame isolante est plus mince. On conçoit, par conséquent, qu'en diminuant graduellement l'épaisseur de cette lame on puisse arriver à obtenir un pouvoir condensant très-grand. Mais il est très-important de remarquer

qu'à mesure que le pouvoir condensant augmente, la quantité absolue de l'électricité qu'on peut accumuler diminue, car la résistance à la réunion des fluides devient de plus en plus petite. On doit donc distinguer deux sortes de condensateurs : les uns, formés d'une lame isolante très-mince, ont un pouvoir condensant très-grand et sont applicables à des sources faibles d'électricité ; les autres, formés d'une lame isolante assez épaisse pour que la charge puisse être effectuée avec les machines ordinaires, ont par suite un pouvoir condensant médiocre, mais on peut recueillir avec eux une grande quantité d'électricité en multipliant la surface des armatures.

460. Électroscope condensateur. — A la première catégorie se rapporte l'électroscope condensateur de Volta, appareil qui a rendu à la science de l'électricité les plus grands services. Il se compose d'un électroscope à feuilles d'or, dont le bouton est remplacé par un plateau, couvert supérieurement d'un vernis isolant. Un second plateau, verni à sa partie inférieure, repose sur le premier, et forme avec lui un condensateur. Si, touchant le plateau supérieur avec le doigt, on met en contact le plateau inférieur avec une source très-faible d'électricité, celle-ci s'accumulera en quantité considérable relativement à celle de la source;

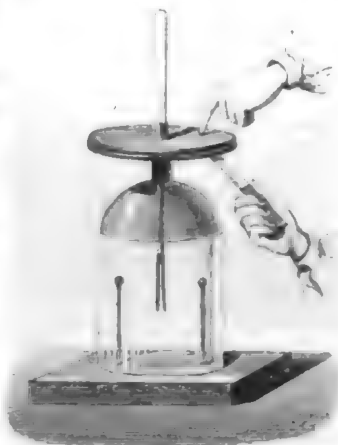


Fig. 391. — Électroscope condensateur.

car la lame isolante étant très-mince, le pouvoir condensant est très-grand. Si donc, au bout de quelque temps, on supprime la communication avec le sol, et qu'on enlève le plateau collecteur, les feuilles d'or divergeront par suite du fluide répandu dans l'autre plateau, et qui est de même nom que celui de la source. Le condensateur de Volta n'a d'efficacité véritable que dans le cas d'une *source* électrique; s'il s'agissait d'un corps simplement électrisé, la quantité d'électricité étant limitée, la condensation serait sans objet et par suite l'électroscope ordinaire serait aussi avantageux.

461. Jarres et batteries électriques. — Les appareils de la seconde catégorie sont en général formés de bouteilles de Leyde, de grandes dimensions, qu'on désigne sous le nom de *jarres électriques*. Les *batteries électriques* (fig. 392) sont formées de la réunion d'un certain nombre de jarres placées dans une caisse doublée en métal. Toutes les armatures extérieures communiquant ainsi ensemble

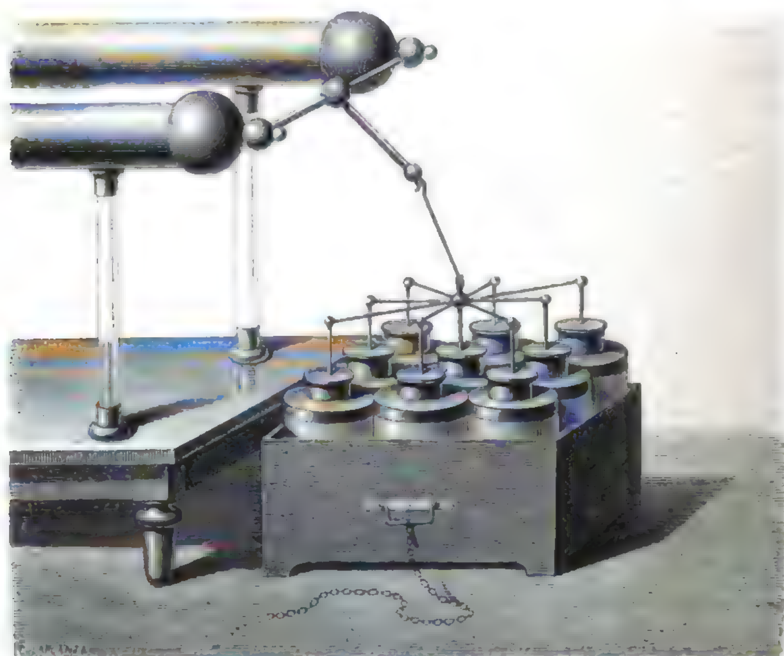


Fig. 392. — Batterie électrique.

n'en font qu'une seule. Quant aux armatures intérieures, elles sont réunies également par un système de tringles, de sorte qu'une batterie n'est évidemment autre chose qu'une très-grande jarre dont la surface conductrice équivaudrait à la somme des surfaces des jarres qui la constituent.

Pour charger une batterie, on fait communiquer, comme le montre la figure, l'armature intérieure avec la machine; l'armature extérieure est mise en communication avec le sol à l'aide d'une chaîne et d'une anse en métal, communiquant elle-même avec la lame intérieure de la caisse. La complète communication

avec le sol est une condition fort importante; il ne suffit pas de laisser tomber la chaîne sur le sol, il convient de l'attacher, quand cela est possible, aux conduites d'eau ou de gaz, ou à quelque grande pièce en métal entrant dans la construction de l'édifice.

Malgré ces précautions, lorsque les conditions atmosphériques sont peu favorables, la charge d'une batterie est une opération très-pénible et souvent impossible. Cela est facile à comprendre : en effet, l'addition de la batterie équivaut à un conducteur dont la surface serait égale à la surface réelle de l'armature intérieure multipliée par le pouvoir condensant. La même quantité d'électricité se répandant sur un conducteur beaucoup plus étendu, la charge doit naturellement s'accroître avec plus de lenteur. En outre, la surface par laquelle a lieu la déperdition se trouve elle-même plus considérable, puisqu'elle est augmentée de celle de l'armature intérieure; l'égalité entre la quantité d'électricité produite et celle qui se perd devra donc s'établir plus tôt que quand le conducteur est seul.

On a un très-grand avantage à substituer, pour la charge de la batterie, la machine de Holtz à la machine ordinaire. On fait pour cela communiquer les deux pôles de la machine avec les deux armatures de la batterie. Quand l'air est sec, la charge se fait avec une rapidité vraiment surprenante et qui donne une idée de la très-grande quantité d'électricité que fournit ce nouveau modèle de machine.

462. Figures de Leichtemberg. — La bouteille de Leyde permet de faire une expérience due au physicien Leichtemberg, qui met en évidence une différence de propriétés physiques des deux électricités positive et négative. C'est à raison de cette circonstance que cette expérience excita, à l'époque de sa publication, un très-grand intérêt.

On prend une bouteille de Leyde chargée à la manière ordinaire, et à l'aide du bouton on trace des traits sur un disque de résine; on pose ensuite la bouteille sur un isoloir, on la saisit par le bouton et on vient tracer avec la panse d'autres traits sur le disque. D'autre part, on mêle dans l'intérieur d'un soufflet du soufre et du minium pulvérisés et on projette ce mélange à la surface du disque. Le soufre, qui est électrisé négativement par son frottement avec le

minium, se porte surtout sur les traits positifs et le minium sur les traits négatifs.

On distingue donc très-nettement la couleur jaune des traits

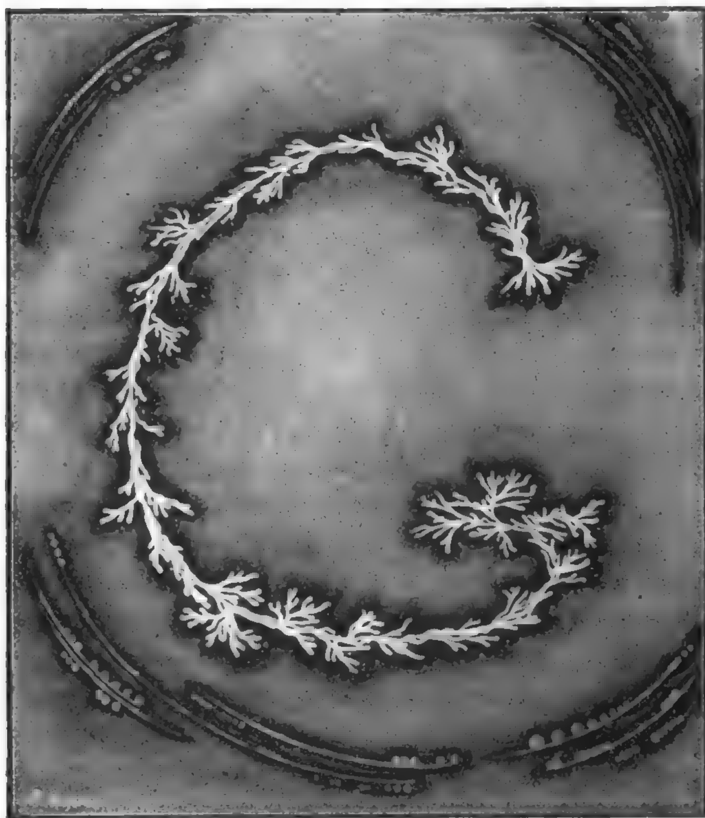


Fig. 393. — Figures de Leichtemberg.

positifs et la couleur rouge des traits négatifs. On reconnaît que les particules de soufre, qui dans la figure 393 sont à l'intérieur, forment des espèces de radiations linéaires et divergentes, tandis que le minium donne lieu à des masses circulaires, accusant comme une résistance plus grande offerte par le corps isolant au fluide négatif. Une circonstance analogue a été signalée à propos des aigrettes.

CHAPITRE XLI.

EFFETS PRODUITS PAR LA DÉCHARGE DES CONDENSATEURS.

463. Décharge des batteries. — On peut, à l'aide des bouteilles de Leyde ou des batteries, obtenir des effets qui ne diffèrent du reste que par l'intensité de ceux que produit une simple étincelle électrique. Les effets physiologiques ont déjà été indiqués; ils se produisent, par exemple, lorsqu'une personne, tenant une bouteille chargée à la main, vient de l'autre main toucher le bouton; la commotion, déjà très-vive avec une bouteille de petites dimensions, devient redoutable avec une jarre et à plus forte raison avec une batterie.

On peut exciter la commotion chez un très-grand nombre de personnes à la fois. Il suffit que ces personnes forment une chaîne en se tenant par la main; celle qui forme l'une des extrémités tient la bouteille par la panse, et celle qui est à l'extrémité opposée vient toucher le bouton. Toutes les personnes paraissent ressentir la secousse au même instant, mais celles du milieu sont un peu moins éprouvées. On a essayé autrefois d'appliquer cette commotion à la guérison de certaines maladies, telles que la paralysie; mais les procédés imaginés dans ce but sont aujourd'hui oubliés. Nous citerons parmi les expériences fondées sur l'effet physiologique de la décharge électrique, celle du *carreau magique* ou *fulminant*. C'est une lame de verre (fig. 394) dont chaque face est recouverte d'une feuille d'étain. On place le carreau à peu près horizontalement et on fait communiquer sa face supérieure avec la machine électrique, tandis que sa face inférieure communique avec le sol.

Dans ces circonstances, si une personne essaye de prendre une pièce de monnaie placée sur la face supérieure, au moment où le doigt arrive à une petite distance de la pièce, les électricités des deux armatures se réunissent en produisant une étincelle, à l'aide du sol

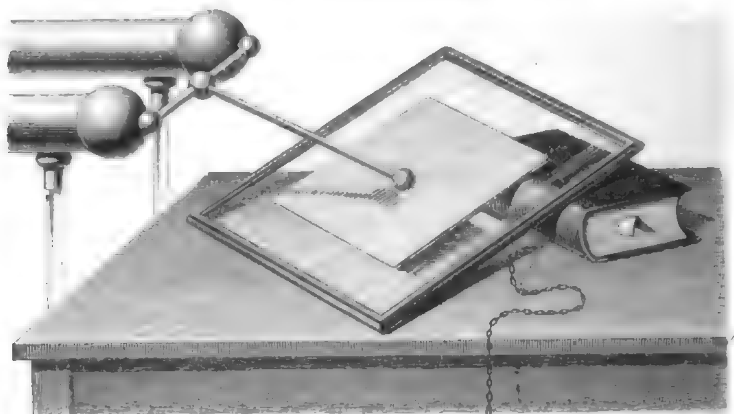


Fig. 394. — Carreau magique.

et du corps de l'observateur; celui-ci éprouve une forte secousse, qui lui fait fléchir le bras et l'empêche de saisir la pièce.

C'est par une disposition analogue que les électriciens des places publiques donnent la commotion de la bouteille. Celle-ci est placée au-dessous des conducteurs de la machine et communique avec eux par son armature intérieure. Dès qu'un spectateur vient à approcher le doigt ou du conducteur ou d'une pièce métallique en communication avec lui, il éprouve une forte secousse. La secousse peut s'étendre à un certain nombre de personnes qui formeraient une chaîne.

464. Échauffement des fils métalliques. — Lorsqu'une décharge se produit à travers un système conducteur, il y a une élévation de température due à l'ébranlement moléculaire qui accompagne toujours la réunion des fluides (442). Avec les bouteilles ou les batteries on peut très-aisément produire l'incandescence de fils très-fins. On les place, comme le montre la figure 395, entre les branches *a* et *b* d'un appareil appelé *excitateur universel;* ces branches sont en métal et supportées par des colonnes de verre.

L'une des branches étant mise en communication avec l'armature extérieure d'une batterie, on fait communiquer l'autre avec l'armature intérieure par le moyen de l'excitateur à manches de verre. Au moment où se produit l'étincelle, le fil rougit, fond ou

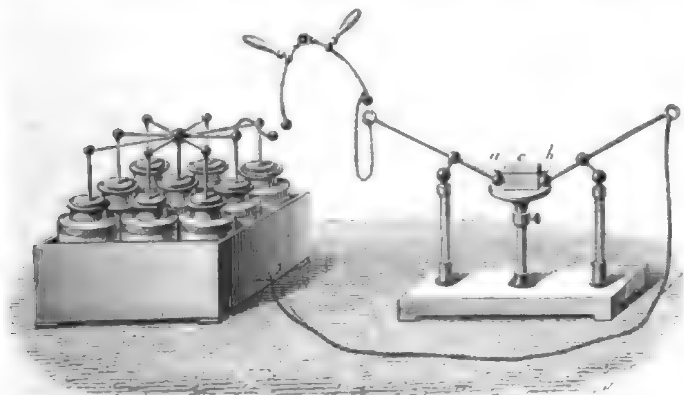


Fig. 395. — Excitateur universel.

brûle suivant sa nature chimique, et laisse une trace sur une feuille de papier *c* placée derrière. Lorsqu'on se sert d'un fil d'or, c'est une trace violette formée par la vapeur d'or qui présente l'analogie la plus complète avec les taches que la foudre laisse sur les murs quand elle a frappé des cordons de sonnette renfermant des fils dorés.

465. Portrait de Franklin. — La volatilisation de l'or donne lieu à une très-jolie expérience connue sous le nom de *portrait*

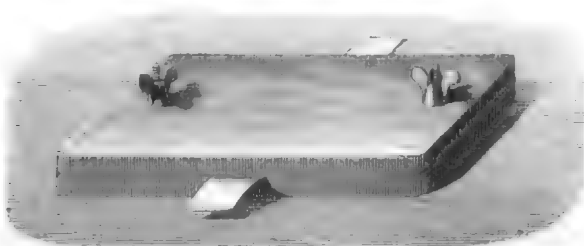


Fig. 396. — Presse pour le portrait électrique.

électrique. On pratique sur une feuille de carton (fig 397) des découpures dont l'ensemble forme un dessin, le portrait de Franklin par

exemple; des lames d'étain sont collées de chaque côté de la feuille. En avant de la découpure on place une feuille d'or et en arrière un petit carton blanc; on recouvre la feuille d'or des parties qu'on voit en haut et en bas de la figure et on place le tout sur une presse (fig. 396) qu'on serre fortement, en laissant déborder les lames d'étain. La presse est placée elle-même sur le support de l'excitateur universel et on amène les boules au contact des lames d'étain. On fait alors passer la décharge, l'or se volatilise et va produire, aux points placés vis-à-vis des jours de la découpure, des taches violettes qui reproduisent le dessin.



Fig. 397. — Expérience du portrait de Franklin.

466. Vitesse de propagation de l'électricité. — Aussitôt après la découverte de la bouteille de Leyde, on essaya à diverses reprises de mesurer la vitesse avec laquelle se propage la décharge dans la chaîne conductrice qui réunit les deux armatures. Watson, vers 1748, opérait de la manière suivante : Deux fils de fer, de 1872 mètres de longueur, étaient disposés sur des supports isolants et repliés de manière que les quatre bouts fussent à côté les uns des autres; l'un des bouts intermédiaires est en communication avec l'armature extérieure d'une bouteille, et l'autre peut être rapproché de l'armature intérieure. Watson prenait à la main les deux bouts extrêmes et on faisait passer l'étincelle. Bien que les deux électricités eussent chacune 1872 mètres à parcourir pour arriver au corps de l'observateur, il ne put jamais parvenir à saisir le plus petit intervalle de temps entre le moment où se produit l'étincelle et celui où la commotion est ressentie. On en conclut que la vitesse de transmission de la décharge était beaucoup trop grande pour permettre une mesure directe.

M. Wheatstone, vers 1836, a repris les expériences de Watson, mais en y appliquant la méthode du miroir tournant dont nous avons parlé plus haut (437). Il faisait passer la décharge d'une batterie dans une chaîne présentant trois solutions de continuité, ce qui donnait lieu à trois étincelles. En opérant devant le miroir, on observe dans la position des images un déplacement dû à la transmission dans le conducteur. Suivant une des expériences, la décharge emploierait 1/1152000 de seconde pour parcourir un fil de cuivre de 400 mètres de longueur; donc, dans une seconde, l'espace parcouru serait égal à 1152000 × 400^{m} = 460 800 000 mètres, ce qui fait environ 115 000 lieues; c'est une vitesse supérieure à celle de la lumière, qui parcourt 77 000 lieues par seconde.

Le mode d'expérimentation employé par M. Wheatstone présente de très-grandes difficultés de mesure; ce n'est donc pas tant au nombre obtenu qu'il convient d'attacher de l'importance qu'au fait lui-même. Il est établi en effet, par cette expérience, qu'au moment où l'on réunit les deux armatures d'une bouteille de Leyde, il se produit, à partir du point de contact et dans les deux sens, sur le conducteur de décharge, une sorte de courant qui se propage d'ailleurs avec une extrême rapidité.

467. Résistances relatives. — Il est probable, d'après les expériences faites ultérieurement sur le courant électrique proprement dit, que les résultats seraient différents si l'on changeait la nature du fil, si, par exemple, on substituait au cuivre le fer et surtout le platine. Cela provient de la différence de conductibilité entre les différents métaux, c'est-à-dire du plus ou moins de résistance qu'offrent leurs molécules au mouvement des fluides dans leur intérieur. L'élévation de température des fils devant être attribuée à l'ébranlement des molécules est d'autant plus considérable que la conductibilité est moindre. C'est ce qui résulte de diverses expériences et notamment de celles de M. Riess, que nous rappellerons plus loin à propos de l'échauffement des fils par les courants voltaïques. Dans les recherches de cette nature, la quantité d'électricité employée pour la charge de la batterie se mesure à l'aide d'un instrument appelé *bouteille électrométrique de Lane.*

C'est une bouteille de Leyde dont l'armature externe commu-

nique par *m* avec une colonne verticale conductrice (fig. 398). Au sommet de celle-ci peut glisser une tige *b*, de façon à placer la boule terminale à des distances variables de la boule *a*.

Pour se servir de l'appareil, on met en communication son armature interne avec l'armature externe de la batterie isolée, et l'on fait communiquer la colonne avec le sol. A mesure que la batterie se charge, la bouteille se charge aussi. Lorsque la quantité d'électricité aura atteint une certaine limite, une étincelle jaillira entre *a* et *b* et il y aura une décharge spontanée de la bouteille. Après cela la charge recommencera, et il est bien évident que si l'on maintient les boules *a* et *b* à la même distance, chacune des étincelles correspond à une quantité d'électricité déterminée et que l'on peut prendre pour unité. Les charges successives d'une batterie peuvent donc être mesurées par le nombre d'étincelles de décharge de la bouteille électrométrique.

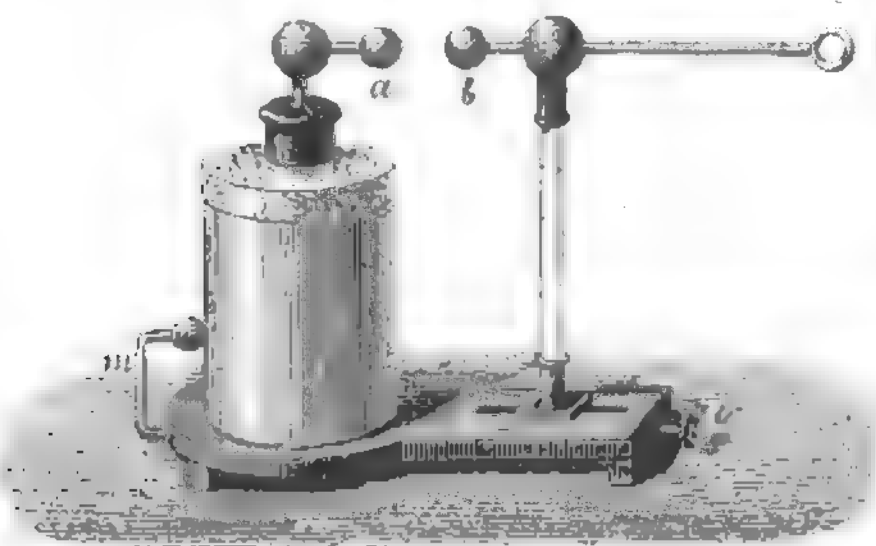


Fig. 398. — Bouteille électrométrique de Lane.

468. Effets mécaniques. — La décharge électrique à travers les corps mauvais conducteurs donne lieu à diverses expériences très-connues.

1° *Perce-carte.* — On place une carte (fig. 399) entre deux pointes faisant partie de deux garnitures métalliques séparées l'une de l'autre par une colonne de verre. La partie inférieure étant mise en communication avec l'armature extérieure d'une bouteille de Leyde que l'on tient à la main, on approche le bouton de l'autre conducteur; il se produit une étincelle qui se reproduit entre les deux pointes et qui détermine la perforation de la carte. On remarque dans cette expérience que le trou n'est pas au milieu de l'intervalle des deux pointes, il est au contact de la pointe négative. Cet effet paraît dû à la présence de l'air. En effet, en disposant l'expérience de manière à pouvoir raréfier l'air ambiant, on remarque qu'à mesure que la force élastique diminue, le trou se rapproche du milieu.

L'expérience du perce-carte se fait très-commodément avec la machine de Holtz. On met pour cela les deux conducteurs en communication avec les armatures d'un petit condensateur; le flux d'électricité se trouve remplacé, dans ce cas, par de brillantes étincelles

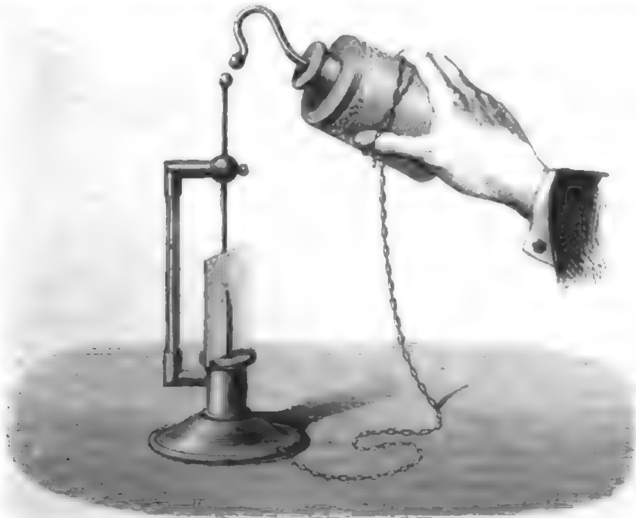


Fig. 390. — Perce-carte.

qui se succèdent entre les deux pôles avec une assez grande rapidité. On n'empêche point le phénomène de se produire quand on interpose une carte, seulement celle-ci se trouve criblée d'autant d'ouvertures qu'il y a eu d'étincelles produites à travers son épaisseur.

2° *Perce-verre.* — Le perce-verre se compose d'un tube servant de support à une lame de verre (fig. 400) qui se trouve ainsi placée exactement au contact d'une pointe métallique située dans l'axe du tube. Une pointe mobile placée au-dessus et isolée de la première est amenée au contact de la face supérieure de la lame. On fait alors passer l'étincelle, soit d'une jarre électrique, soit d'une batterie, et si l'expérience réussit, il se produit un trou dans lequel le verre est pulvérisé.

L'expérience échoue quelquefois parce que l'étincelle contourne la lame de verre, c'est pour cela que l'on met une goutte d'huile sur la lame au contact de la pointe supérieure. Cette précaution n'est pas toujours suffisante, et lorsque l'expérience a

échoué une fois, il faut absolument changer la lame de verre; en employant la même lame, l'électricité suit, pour ainsi dire, inévi-

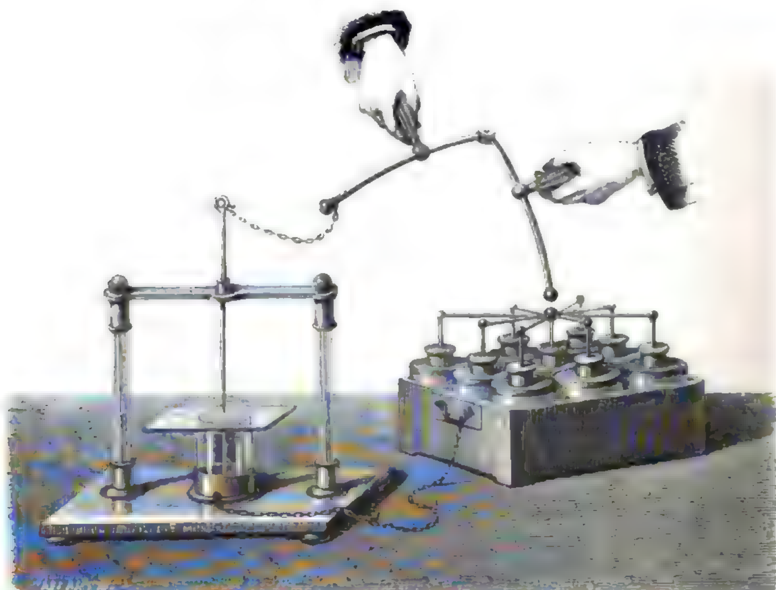


Fig. 400. — Perce-verre.

tablement le chemin qu'elle s'est tracé à la première décharge.

469. Effets calorifiques. — La puissance calorifique des décharges des bouteilles ou des batteries peut être considérable. On obtient avec elle des effets analogues à ceux que donne l'étincelle, mais plus intenses. Ainsi, par exemple, si l'on vient à décharger une forte jarre électrique à l'aide d'un excitateur dont l'une des boules est entourée de fulmi-coton (fig. 401), au moment où l'étincelle jaillit le fulmi-coton s'enflamme.



Fig. 401. — Inflammation du fulmi-coton.

On peut par une disposition analogue enflammer du coton ordinaire saupoudré de résine. En Autriche on s'est servi du passage de l'étincelle à travers un mélange de poudre de sulfure d'antimoine et de matières oxygénantes pour déterminer l'inflammation des fourneaux de mine. Les machines électriques employées dans ce but sont des machines de Winter légèrement modifiées par le colonel d'Ebner. Les conducteurs de la machine sont de dimensions très-réduites, et on n'en fait, à vrai dire, aucun usage; on se borne à charger les bouteilles. Celles-ci sont mises, par leur armature extérieure, en pleine communication avec le sol; le mélange à enflammer est traversé par deux fils : l'un communique avec le sol, l'autre est mis en rapport avec l'armature intérieure à l'aide d'un fil recouvert de gutta-percha.

CHAPITRE XLII.

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE.

470. Analogies de la foudre et de l'étincelle électrique. — L'analogie qui existe entre les effets de la foudre et ceux de l'étincelle électrique a depuis longtemps frappé les esprits. La foudre, en effet, brise, déchire les corps mauvais conducteurs, elle enflamme ceux qui sont combustibles; elle échauffe, rougit, fond et volatilise les métaux; elle frappe d'une façon plus ou moins grave, souvent mortellement, les hommes ou les animaux : ce sont là les effets mêmes de l'étincelle électrique, et les différences que l'on peut observer ne dépendent que de l'intensité [1]. Ajoutons que les coups de

1. Pour donner une idée de l'intensité des effets produits par la foudre, nous empruntons quelques faits à la célèbre notice d'Arago sur le tonnerre :

Le paquebot *le New-York* reçut un coup de foudre le 19 avril 1827. Il y avait au sommet du grand mât une baguette de fer de $1^{m},2$ de long, de 11 millimètres de diamètre à sa base et qui se terminait à l'extrémité opposée par une pointe très-aiguë. La portion supérieure de la baguette fut fondue sur une longueur de 3 décimètres. Une chaine de 40 mètres fixée à la base de la tige fut fondue dans toute sa longueur.

Le 12 juillet 1770, la foudre tomba, à Philadelphie, sur la maison de M. Joseph Moulde. Elle pénétra par une tige de cuivre de 15 centimètres (diamètre inconnu), qui surmontait le toit, et la fondit complétement.

Dans la nuit du 14 au 15 avril 1718, un coup de tonnerre fit sauter le toit et les murailles de l'église de Gouesnou, près de Brest. Des pierres avaient été lancées dans tous les sens jusqu'à la distance de 51 mètres.

Le 6 août 1809, à Swinton, un coup de foudre atteignit la maison de M. Chadwick. Le mur extérieur du petit bâtiment cave et citerne fut arraché de ses fondations et soulevé en masse. L'explosion le porta verticalement et *sans le renverser* à quelque distance. L'une des extrémités avait marché de 9 pieds, l'autre de 4. Le mur ainsi soulevé et transporté pouvait peser environ 26 tonnes.

Dans la nuit du 26 au 27 juillet 1759, le tonnerre tomba sur le théâtre de la ville de Feltre. Il tua un grand nombre de personnes et blessa plus ou moins tous les autres.

Le 18 février 1770, un seul coup de foudre jeta sans connaissance *tous* les habitants de Keverne (Cornouailles) qui se trouvaient réunis dans l'église pour le service divin.

foudre laissent toujours après eux une odeur très-caractéristique, tout à fait semblable à celle que l'on ressent dans le voisinage d'une machine électrique en activité et qui n'est autre chose, comme on le sait aujourd'hui, que l'odeur de l'ozone. D'ailleurs la forme de l'étincelle, sa lumière, le bruit qui l'accompagne rappellent si bien l'éclair, que lorsque pour la première fois Otto de Guericke parvint à tirer une petite étincelle, il établit un rapprochement entre ces deux phénomènes. Dès cette époque on fut généralement porté à supposer que des manifestations aussi semblables devaient être attribuées à une même cause et que la foudre n'était autre chose qu'un phénomène électrique. « Cette idée me plaît beaucoup, disait l'abbé Nollet, et combien de raisons spécieuses pour la soutenir ! »

Toutefois ce n'était là qu'une opinion plausible. C'est à Franklin que revient l'honneur d'avoir, par une expérience directe, qui a été répétée un grand nombre de fois depuis, démontré que les nuages orageux sont chargés d'électricité. Cette expérience consiste à lancer contre un nuage orageux un cerf-volant terminé par une pointe; l'électricité agissant par influence sur le cerf-volant et sur la corde qui le retient, l'extrémité de celle-ci doit donner des signes d'électricité. C'est ce qu'après quelques essais infructueux Franklin observa.

A peu près à l'époque où Franklin exécutait cette mémorable expérience, un physicien français, de Romas, la faisait de son côté (7 juin 1753), et dans des conditions plus favorables. La corde, de 260 mètres de longueur, était entourée sur toute son étendue d'un fil de cuivre. L'extrémité inférieure était isolée du sol par un cordonnet de soie; elle portait un cylindre en fer-blanc communiquant avec le fil de cuivre et qui devait servir à tirer des étincelles en cas d'électrisation. L'appareil étant lancé contre des nuages orageux, de Romas, armé d'un excitateur à manche de verre, parvint à tirer du cylindre une série d'étincelles, dont quelques-unes avaient une très-grande intensité. L'une d'elles, de $0^{m},30$ de longueur environ, l'atteignit lui-même, malgré l'excitateur, et lui donna une commotion qui faillit le renverser.

471. Expérience de Dalibard. — Avant les expériences de

Romas, Dalibard, suivant les indications de Franklin, avait disposé un appareil d'un genre différent et qui conduit au même résultat. Il consistait en une barre de fer terminée en pointe à sa partie supérieure établie sur le haut d'une maison de Marly. A la partie inférieure, la barre était isolée et pouvait être mise en communication avec divers appareils propres à mettre en évidence la présence de l'électricité. L'expérience se fit, avec un plein succès, le 10 mai 1752; un orage s'étant formé au-dessus de Marly, on put pendant longtemps tirer de la partie inferieure de la barre des étincelles dont quelques-unes avaient une assez grande intensité.

Plusieurs savants répétèrent l'expérience de Marly et toujours avec plus ou moins de succès. C'est en se livrant à des recherches de cette nature, que le professeur Richman, de Saint-Pétersbourg, fut frappé mortellement (août 1753).

472. Carillon électrique. — Afin d'être avertis de l'électrisation de la barre, plusieurs observateurs se servaient de l'instrument imaginé par Franklin et connu sous le nom de *carillon électrique*. Il est formé d'une tringle métallique portant trois timbres; les deux extrêmes communiquent électriquement avec elle par des chaînes en métal; le troisième en est isolé et communique avec le sol. Deux petites balles sont suspendues entre les timbres à l'aide de fils de soie. Dès que l'appareil s'électrise, elles sont attirées d'abord par les timbres extrêmes, puis repoussées vers le timbre du milieu qui les ramène à l'état naturel. De là une série de chocs qui se continuent pendant tout le temps que l'électricité arrive sur la tringle.



Fig. 402. — Carillon électrique.

473. Théorie de l'orage. — D'après ces diverses observations, on doit considérer les nuages orageux comme des corps conducteurs chargés d'électricité. Ces corps agissant par influence sur la surface de la terre, il peut jaillir entre eux et un point du sol une étincelle ; on dit alors que ce point a été foudroyé. La lumière de l'étincelle constitue l'éclair et le bruit qui l'accompagne est le bruit

du tonnerre. Souvent l'étincelle se produit entre des points appartenant aux nuages eux-mêmes; alors on observe l'éclair, on entend le bruit du tonnerre, mais aucun point du sol ne se trouve atteint, le tonnerre ne tombe pas.

474. Éclairs. — On distingue plusieurs espèces d'éclairs : 1° les éclairs sinueux, formés d'une ligne lumineuse en zigzag, qui a avec l'étincelle proprement dite la ressemblance la plus complète; 2° les éclairs en masse, qui consistent dans une illumination générale du ciel, et qui sont probablement des éclairs de la première classe qu'on ne voit qu'à travers un voile de nuages. L'illumination produite par les éclairs de la première et de la seconde espèce dure un temps à peine appréciable, et qui n'atteint certainement pas un dix-millième de seconde; c'est précisément un caractère de l'étincelle électrique. Pour constater cette sorte d'instantanéité, on se sert d'un disque circulaire divisé en secteurs alternativement blancs et noirs (fig. 403) auquel on imprime un mouvement de rotation rapide. Si l'on observe le disque à la lumière ordinaire, chacun de ses points donnera lieu à des impressions successives qui, si le mouvement de rotation est assez rapide, changeront de nature avant que l'action des précédentes sur la rétine ait cessé. Il en résultera la sensation générale d'une teinte grise, mélange du noir et du blanc. Si on observe la séparation des secteurs blancs et noirs, c'est que l'éclairement aura duré moins de temps que ne met le disque à se déplacer de l'arc correspondant à un secteur. Supposons, par exemple, que la vitesse soit de 180 tours par seconde, et qu'il y ait 60 secteurs, chacun d'eux aura une valeur angulaire de 6°. Or, une seconde correspondant à une rotation de $180 \times 360° = 64800°$, une rotation de 6° correspond à $\frac{1}{10000}$ de seconde environ. Or quand on observe le disque tournant, à la lueur de l'éclair, on distingue très-nettement, non pas les secteurs absolument distincts, ce qui ne pourrait avoir lieu qu'avec une lumière instantanée, mais des parties blanches et noires séparées par des portions grises. On doit en conclure que l'éclair dure moins de $\frac{1}{10000}$ de seconde.


Fig. 403. Mesure de la durée de l'éclair.

475. Éclairs sphériques. — Ces éclairs diffèrent notablement des précédents; ce sont des sphères lumineuses qui descendent du ciel avec une certaine lenteur, qu'on peut apercevoir pendant huit ou dix secondes; elles arrivent sur le sol, y rebondissent souvent à la manière des corps élastiques, viennent quelquefois se fixer sur la pointe d'un paratonnerre et éclatent enfin avec un bruit formidable, en produisant tous les effets dus à la chute de la foudre. On ignore, dans l'état actuel de la science, la nature des éclairs sphériques, aucune expérience de cabinet de physique ne pouvant donner une idée de leur formation. On a la preuve toutefois qu'ils se lient d'une manière continue aux éclairs des deux premières espèces. En effet, le graveur Solokoff, qui assistait Richman dans les expériences dont nous avons parlé (471), raconta que plusieurs étincelles de forme ordinaire avaient été tirées du conducteur, et que celle qui atteignit mortellement le professeur se détacha spontanément et avait une forme sphérique.

476. Bruit du tonnerre. — Le bruit du tonnerre est accompagné de redondances tout à fait caractéristiques, dont on peut aisément se rendre compte. En effet, les nuages ne peuvent être assimilés à des conducteurs métalliques; il est probable qu'au moment où a lieu quelque part une étincelle, il s'en produit un grand nombre d'autres en différents points, d'une façon analogue à ce qui a lieu dans les tubes étincelants. Il y a donc simultanément une série d'explosions dont le bruit n'arrive que successivement à l'oreille de l'observateur. Si, par exemple, l'éclair se produit sur la ligne sinueuse MN (fig. 404), on voit qu'un observateur placé en O entendra d'abord l'explosion qui a eu lieu en *a*, puis, un peu plus tard, les cinq explosions produites en *m*, *n*, *r*, *s*, *t*; il y aura donc accroissement dans l'intensité du son. Les coups foudroyants sont généralement dus à une étincelle unique : aussi ne présentent-ils pas habituellement les redondances dont nous parlons ici, et il est assez facile de les

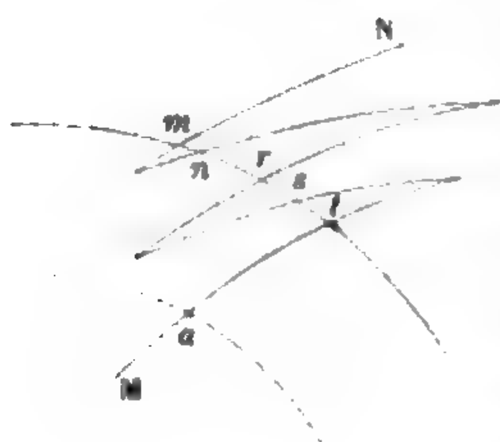


Fig. 404.

reconnaître parmi les nombreux coups de tonnerre que l'on entend pendant un orage.

477. Choc en retour. — Il arrive quelquefois qu'à une grande distance du point où la foudre tombe, des hommes ou des animaux, sans être atteints eux-mêmes par aucune étincelle, éprouvent de violentes secousses ou même sont frappés mortellement. Ce phénomène, désigné sous le nom de *choc en retour,* est très-facile à comprendre. En effet, sous l'influence d'un nuage orageux, tous les points de la surface du sol sont dans un certain état électrique. Au moment de l'étincelle, l'équilibre est rompu; il se produit donc dans leur intérieur un mouvement brusque des fluides, qui peut avoir les mêmes effets que le choc direct de l'étincelle. Ce phénomène se produit à chaque instant dans le voisinage des machines électriques; les pendules, les électroscopes, manifestent des mouvements très-marqués à chaque fois qu'on tire une étincelle. Une grenouille écorchée éprouve dans les mêmes circonstances des convulsions très-vives. C'est en observant pour la première fois ce fait que Galvani fut conduit à des expériences qui devaient donner naissance à toute une partie nouvelle de la physique.

On peut déterminer l'explosion du pistolet de Volta à l'aide du choc en retour. On dispose sur les montants de la machine électrique un appareil de ce genre dont le bouton est mis en communication avec le sol par une chaîne métallique. Si, pendant que la machine fonctionne, on vient à tirer une étincelle, il se produit dans la chaîne un mouvement de fluide qui reproduit l'étincelle dans l'intérieur et détermine l'explosion du mélange.

Il convient de remarquer d'ailleurs que les phénomènes de choc en retour graves, bien constatés, à une distance un peu notable du point directement foudroyé, sont excessivement peu nombreux; le coup explosif ne peut modifier en effet l'état du nuage qu'à une petite distance. Mais dans le voisinage du point où est tombée la foudre, des hommes ou des animaux éprouvent fréquemment des atteintes plus ou moins violentes qu'on attribue au choc direct et qui sont vraiment des effets du choc en retour.

478. Paratonnerre. — L'expérience ayant constaté que l'électricité se porte de préférence sur les meilleurs conducteurs, on com-

prend que si on vient à armer un édifice de barres métalliques en communication avec le sol, la foudre se portera sur ces masses conductrices et se dissipera dans le réservoir commun sans que l'édifice lui-même éprouve de dommages. C'est là le principe essentiel des paratonnerres ; mais, indépendamment de cette action protectrice, ces appareils peuvent exercer une action préventive et empêcher, dans le plus grand nombre de cas au moins, la production de coups foudroyants ; il suffit pour cela qu'ils se terminent par une pointe à leur extrémité supérieure. Dans ces circonstances, si l'influence d'un nuage orageux vient à se faire sentir, l'électricité neutre du paratonnerre sera décomposée, l'électricité de même nom que celle du nuage sera repoussée dans le sol, tandis que l'électricité de nom contraire s'écoulera par la pointe.

En même temps que se produit l'écoulement du fluide par la pointe du paratonnerre, il y a neutralisation du point correspondant du nuage qui se trouve ainsi partiellement déchargé. On rend très-sensible cet effet des pointes par l'expérience suivante : Pendant qu'une machine électrique est en activité et que le pendule est à

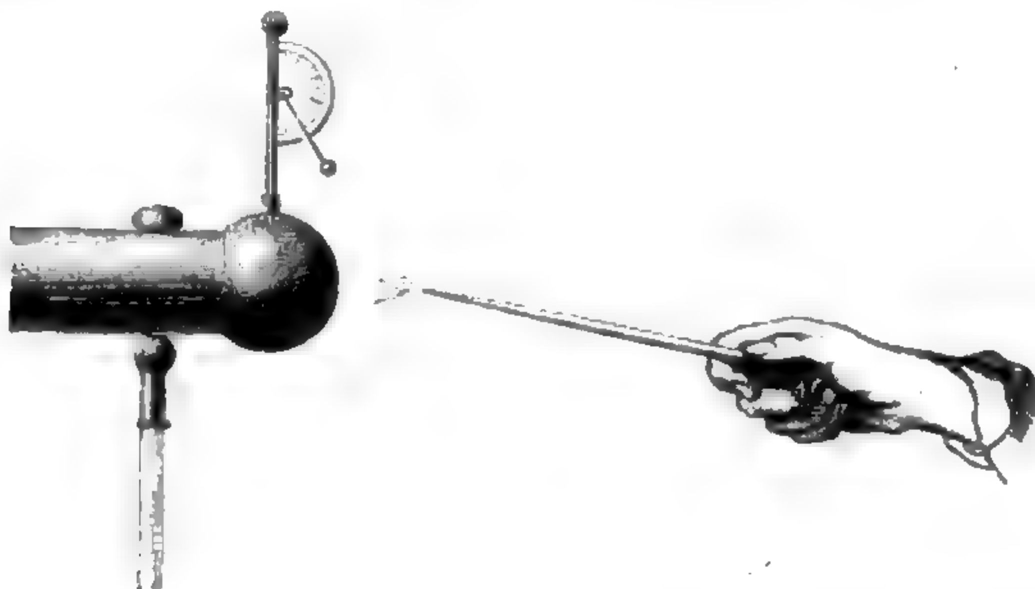


Fig. 405. — Décharge d'un conducteur électrisé par l'action d'une pointe.

son écart maximum, on approche une pointe (fig. 405) ; on voit le pendule retomber immédiatement dans la verticale, et d'aucun des points du conducteur on ne peut tirer d'étincelle. Dans l'obscurité la pointe présente une aigrette lumineuse, image exacte de celle qui se produit quelquefois sur la pointe des paratonnerres dans les temps très-orageux.

Il ne faut qu'avec une grande réserve toutefois assimiler cette

neutralisation du conducteur à celle que peut produire le paratonnerre sur le nuage. Les quantités d'électricité qui sont ici en jeu dépassent tout ce que nous pouvons imaginer, et, à une petite distance du point soumis à l'influence de la pointe, des coups foudroyants peuvent se produire.

Remarquons encore que l'effet naturel du paratonnerre suppose un accroissement graduel de la tension électrique du nuage; si tout à coup de grandes masses d'électricité viennent à se former, le paratonnerre pourra être frappé de la même façon, pour ainsi dire, que lorsque dans une chaudière il se produit une grande quantité de vapeur, la chaudière éclate sans que la soupape de sûreté s'ouvre. Toutefois, même dans ce cas, si la communication avec le sol est bien établie, le paratonnerre exercera l'action protectrice dont nous avons parlé, et la foudre sera dirigée dans le réservoir commun sans dommage pour l'édifice.

479. Construction du paratonnerre. — Pour que le paratonnerre présente les précieux avantages que nous venons d'indiquer, il faut qu'il remplisse plusieurs conditions. Ces conditions sont d'autant plus importantes, que rarement un paratonnerre est inoffensif; s'il est mal construit, bien loin d'être utile, il devient dangereux.

1° La communication avec le sol doit être aussi parfaite que possible : le conducteur ne doit présenter aucune solution de continuité; tous les joints doivent être faits avec des soudures métalliques et sur une surface suffisamment grande. S'il y a un puits dans le voisinage de l'édifice, on y fait arriver le conducteur; si le terrain est sec, on termine le conducteur par trois ou quatre branches enfoncées dans le sol et qu'on entoure de braise ou de coke.

2° Le conducteur doit avoir une section assez forte pour qu'un coup foudroyant ne puisse pas le fondre et le disperser en globules enflammés sur l'édifice. L'instruction spéciale publiée en 1823 par l'Académie des sciences porte le minimum de cette section à $2^{cc},25$.

3° Les grandes masses métalliques de l'édifice, toits, charpentes, etc., doivent être soigneusement mises en communication

avec le paratonnerre, afin que l'électricité de nom contraire produite par l'influence du nuage puisse s'écouler.



Fig. 406. — Tige du paratonnerre.

La figure 406 représente la disposition de la tige; elle a 5 ou 6 centimètres de côté à sa base et va en diminuant graduellement jusqu'au point où se visse la pointe. En *l l'* se trouve le raccord avec le conducteur *b*. La figure 407 représente la pointe de cuivre doré que l'on substitue ordinairement aujourd'hui à la pointe de platine employée autrefois.

Quand l'édifice doit être armé de plusieurs paratonnerres, on les espace en admettant que chacun d'eux protége un rayon sensiblement double de sa hauteur.

Dans les nouvelles instructions sur le paratonnerre, rédigées par M. Pouillet en 1854, on conseille l'emploi d'une branche qui s'étend horizontalement dans le sol à une petite distance de la surface. Tant que le sol est sec, son action est insignifiante et la branche verticale fonctionne seule; mais dès que le sol est rendu très-conducteur par la pluie, c'est elle qui agit pour ainsi dire seule, et en tout cas complète l'action de la branche verticale.

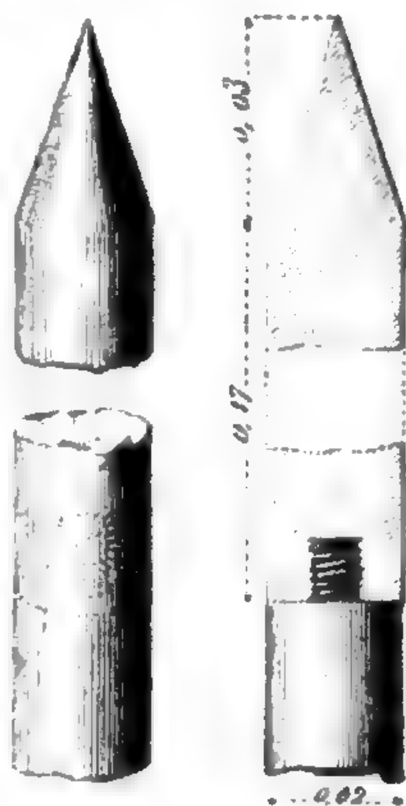


Fig. 407. — Pointe de cuivre doré.

480. Électricité ordinaire de l'atmosphère. — Ce ne sont pas seulement les nuages orageux qui sont chargés d'électricité, l'air renferme toujours, et dans toutes les saisons, de l'électricité. Quand le ciel est serein, cette électricité est constamment positive; elle peut devenir négative quand le ciel se couvre, quand il pleut

ou sous l'influence de phénomènes orageux se produisant à une distance plus ou moins considérable. Quand le temps est orageux, l'air se trouve chargé d'électricité tantôt positive, tantôt négative, ces alternatives pouvant se succéder d'ailleurs avec beaucoup de rapidité.

On étudie l'électricité atmosphérique à l'aide de l'électroscope à feuilles d'or, que l'on surmonte (fig. 408) d'une tige terminée en pointe. Si l'on veut explorer l'état électrique des couches d'air situées à une assez grande hauteur, on lance une flèche attachée à un fil dont l'extrémité forme un anneau lâche autour de la tige de l'électroscope; au moment où cet anneau se détache, la divergence des pailles est produite par de l'électricité de même nom que celle du point de l'atmosphère où se trouve la flèche. C'est par des expériences dirigées de cette manière qu'on a reconnu que la quantité d'électricité répandue dans l'air varie dans le cours d'une journée et présente deux maxima et deux minima. Les heures de ces maxima et minima sont variables avec la saison et sont sans doute liées à l'état hygrométrique de l'atmosphère. On a reconnu en outre que généralement la terre est électrisée négativement, que l'état positif ne commence qu'à une certaine distance du sol, pour aller en croissant d'intensité avec la hauteur.



Fig. 408. — Electroscope pour l'électricité atmosphérique.

481. Causes de l'électricité atmosphérique. — Les causes de l'électricité atmosphérique sont très-diverses; le frottement des couches d'air contre le sol ou entre elles, les phénomènes chimiques, la végétation, y contribuent sans doute, mais dans un sens et une mesure qui ne sont point encore bien déterminés par l'expérience. L'évaporation de l'eau produit aussi de l'électricité, pourvu que cette eau ne soit pas pure, qu'elle renferme une certaine proportion de substances salines; toute l'eau qui s'évapore à la surface du sol est dans ce cas. La vapeur emportant l'électricité posi-

tive, on comprend que cette cause contribue puissamment à l'état négatif du globe.

482. Formation des orages. — Si les explications précédentes suffisent pour expliquer la production de l'électricité dans les temps ordinaires, s'il n'est pas douteux d'ailleurs que les orages soient des phénomènes électriques, on est loin de pouvoir expliquer par le détail comment ils se forment, comment s'accumulent ces quantités prodigieuses d'électricité qui se manifestent quelquefois par des milliers d'explosions en quelques heures. On peut supposer sans doute qu'au moment où la vapeur d'eau se condense pour former les nuages, elle entraîne, à raison de sa conductibilité, l'électricité disséminée dans l'air; mais cela ne donne qu'une idée incomplète du phénomène. On a remarqué qu'assez ordinairement l'orage est précédé par une baisse continue et quelquefois notable du baromètre. On sait qu'un abaissement brusque de la pression est un signe caractéristique de la présence des bourrasques, qui sont toujours plus ou moins électriques.

483. Grêle. — La grêle a évidemment une origine électrique, car elle ne tombe jamais que par les pluies d'orage. C'est ordinairement au printemps ou dans l'été, dans le moment le plus chaud de la journée, presque jamais, chose curieuse, dans la nuit. Les nuages à grêle ont aussi un aspect caractéristique; ils sont peu élevés, d'un ton gris assez homogène, et on entend dans leur intérieur une sorte de roulement sinistre, pronostic bien connu des agriculteurs. Les grêlons sont formés en général d'un noyau neigeux entouré de couches concentriques de glace, qui se sont formées successivement. Leur poids est souvent considérable, plus d'une fois ils atteignent le volume d'un œuf; quelquefois aussi des grêlons se soudent ensemble de manière à former des masses dont le poids peut atteindre plusieurs kilogrammes.

Pour expliquer que des corps d'un poids aussi considérable se soutiennent dans l'air, on a eu recours à diverses hypothèses plus ou moins contestables. Volta supposait que les grêlons placés entre deux couches de nuages électrisés d'une manière contraire vont alternativement de l'un à l'autre par suite de la répulsion qu'ils éprouvent en atteignant l'une des deux couches.

On fait dans les cabinets de physique une expérience connue sous le nom de *grêle électrique*, qui donne une idée de la supposition de Volta. Entre deux plateaux (fig. 409), dont l'un communique avec le sol et l'autre avec la machine, on place un certain nombre de balles en moelle de sureau. Dès qu'on fait tourner le plateau, on voit les balles s'agiter vivement; attirées par le plateau supérieur, elles en sont repoussées ensuite, se déchargent sur le plateau inférieur pour être attirées de nouveau. On remplace quelquefois les balles par de petits bonshommes en moelle de sureau : c'est l'ancienne expérience de la danse des pantins.

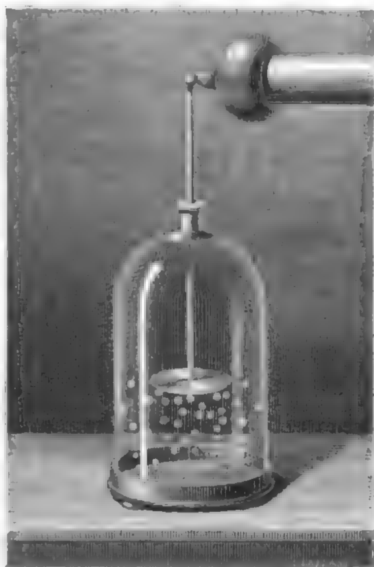


Fig. 409. — Grêle électrique.

Il est évident que la théorie de Volta ne soutient pas l'examen, car, dès que les grêlons ont pénétré dans le nuage inférieur, il n'y a plus de raison pour qu'ils s'élèvent de nouveau, puisqu'ils sont soumis à des forces répulsives dans tous les sens. Si l'on admet, comme on est porté à le faire aujourd'hui, que tous les orages sont dus à ce que l'on appelle un mouvement tournant, c'est à ce mouvement lui-même qu'il faut attribuer la suspension des grêlons, sans qu'il soit besoin d'une théorie particulière. Ce qu'il y a de certain, c'est que les grêlons exécutent dans l'atmosphère des mouvements dont quelques observateurs ont été les témoins oculaires. C'est aux chocs qui en résultent que doit être sans doute attribué le bruit que l'on entend toujours avant la chute de la grêle.

484. Trombes. — Les trombes sont aussi des phénomènes électriques; constituées en elles-mêmes par un tourbillon ou un mouvement tournant d'une grande énergie, elles empruntent à l'électricité un caractère particulier qui explique les prodigieux

effets mécaniques dont elles sont susceptibles. Pour s'en rendre compte, il faut remarquer que dans un orage chaque goutte de pluie qui tombe sur le sol emporte une partie de l'électricité du nuage. Il y a donc ainsi sur une grande étendue, et par une infinité de points, une sorte d'écoulement du fluide électrique, qui



Fig. 410. — Trombe.

contribue graduellement à diminuer et à éteindre finalement les phénomènes orageux. Or, si l'on imagine qu'une portion de la masse des nuages, sous l'action du mouvement tournant, forme une sorte de cône dont la pointe s'approche à une petite distance du sol, c'est par cette voie, relativement très-limitée et pour ainsi dire unique, que s'écoulera l'électricité; sur la pointe s'accumuleront des quantités énormes de fluide, et c'est là bien plus que dans le tourbillon lui-même qu'il faut chercher l'explication des redoutables phénomènes qu'elle produit. Lorsque en effet la pointe atteint la surface de la terre, rien ne résiste à son passage, les arbres sont déracinés, les maisons renversées, les navires soulevés au-dessus des flots et rejetés avec une violence extraordinaire. C'est du reste exclusivement par la voie de la trombe que l'électricité s'écoule; ainsi le tonnerre cesse de gronder ailleurs, on entend seulement un

roulement continu dans le sein de la colonne, qui s'éclaire d'ailleurs surtout à son sommet de lueurs électriques. Une température très-élevée paraît régner au sommet de la trombe, et elle occasionne un dessèchement très-rapide. Peltier a reproduit en petit ce phénomène en disposant au-dessus d'une masse liquide un globe constamment électrisé par l'action d'une machine électrique et muni de tiges, les unes pointues, les autres arrondies; il a pu constater une évaporation trois fois plus rapide que dans les conditions ordinaires. Dans les Antilles et aux régions tropicales, la trombe proprement dite peut ajouter ses effets à ceux du mouvement tournant, qui acquiert dans ces contrées une extraordinaire énergie; aussi les phénomènes de ce genre, qui y sont connus sous le nom de *cyclones*, de *tornados*, donnent-ils lieu à des désastres qui nous paraissent à peine croyables. Ainsi des milliers de personnes tuées, des villes détruites de fond en comble, des récoltes entièrement rasées, tels sont les effets du cyclone qui, dans le cours de l'année 1867, a ravagé l'île Saint-Thomas.

CHAPITRE XLIII.

DES AIMANTS.

485. Aimants naturels et artificiels. — On donne le nom d'*aimant naturel* ou *pierre d'aimant* à une substance minérale qui jouit de la propriété d'attirer le fer. Cette substance n'est autre chose qu'un oxyde de fer, intermédiaire entre le protoxyde et le sesquioxyde; il a pour formule chimique Fe^3O^4. On le rencontre en abondance dans diverses contrées et particulièrement dans le nord de l'Europe, où il forme des masses importantes de minerai, d'où l'on tire les fers très-estimés et très-connus sous les noms de *fers de Suède*.

A l'aide de frictions convenablement exécutées, on peut communiquer la vertu magnétique à des barreaux d'acier qui prennent le nom d'aimants artificiels. Le fer n'est pas d'ailleurs la seule substance sensible à l'action de l'aimant; le nickel, le cobalt et quelques autres corps dont nous donnerons la liste plus loin présentent la même propriété; on les désigne sous le nom de corps magnétiques.

486. Constitution générale des aimants. — La propriété d'attirer le fer n'est pas également répartie dans les différents points d'un aimant, que celui-ci d'ailleurs soit naturel ou artificiel. Si, en effet, on taille un de ces corps sous la forme d'un barreau et qu'on le plonge dans la limaille de fer, on voit, comme le montre la figure 411, que la limaille forme des houppes très-abondantes vers les extrémités, et que la quantité va en diminuant très-rapidement à mesure qu'on se rapproche du milieu. Si l'aimant est court, il y a

toutefois de la limaille adhérente partout; mais, si sa longueur est un peu considérable, il y a une étendue plus ou moins grande dans la région moyenne sur laquelle il n'y a pas d'attraction sensible. Ces particularités se rencontrent toujours, quelle que soit la forme du barreau. On distingue donc dans tout aimant deux régions actives qui sont les extrémités mêmes et que l'on appelle *pôles* et une région inactive ou *neutre,* qui est formée par une portion plus ou moins grande de la partie moyenne.

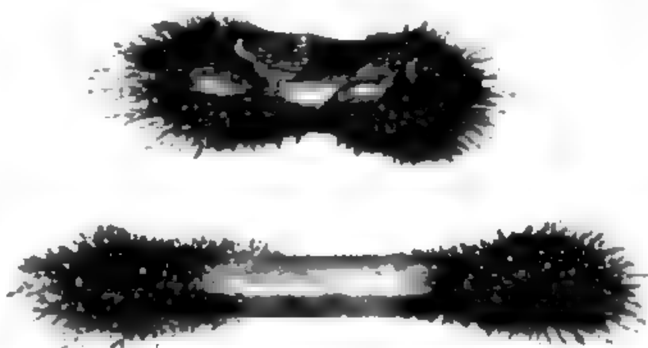


Fig. 411. — Aimants chargés de limaille de fer.

487. Spectre magnétique. — Cette constitution des aimants est rendue très-sensible par la curieuse expérience du spectre magnétique. On place au-dessus d'un barreau aimanté une feuille de carton

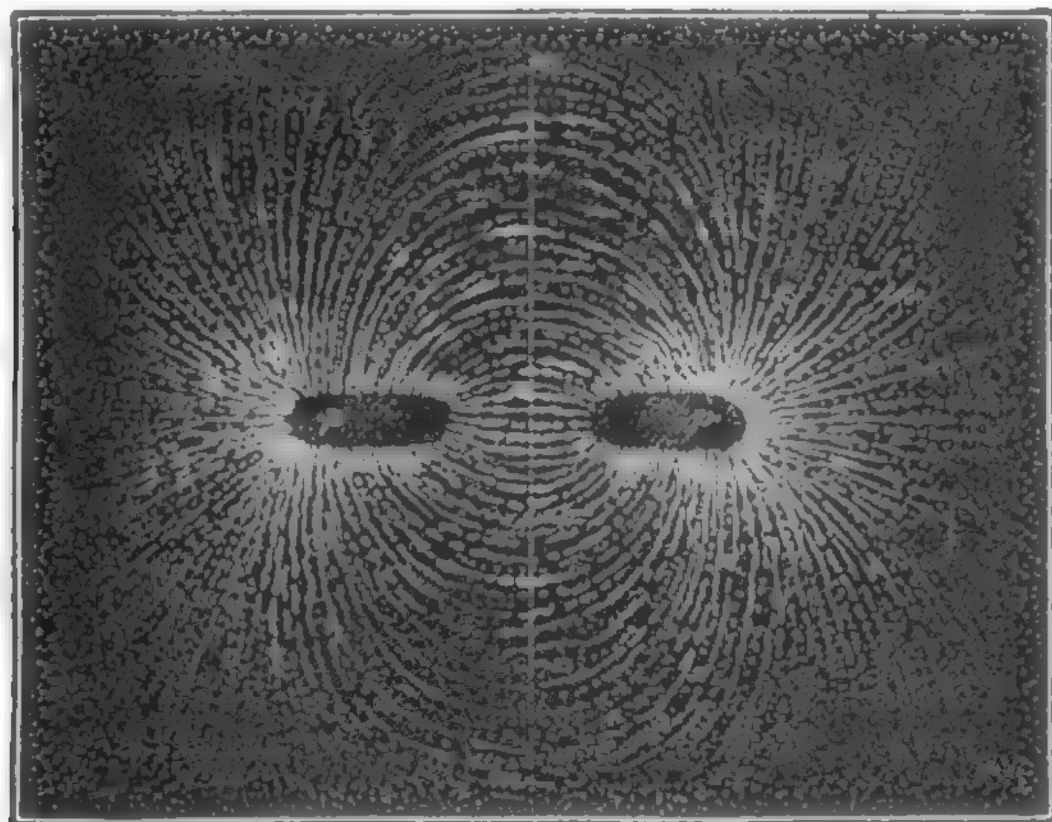


Fig. 412. — Spectre magnétique.

sur laquelle on projette de la limaille de fer très-finement tamisée. On donne ensuite quelques petits chocs à la feuille, afin de favoriser l'action de l'aimant qui s'exerce à travers son épaisseur, et les grains de limaille, obéissant à l'action attractive du barreau, forment des lignes courbes disposées comme le montre la figure 412. Or on voit clairement ainsi que les régions polaires *p, p* sont les centres

de rayonnement des diverses lignes qui affectent toutes les directions possibles, mais qui entourent la partie moyenne de façon à indiquer qu'il n'existe dans cette région aucune attraction appréciable.

488. Courbe des intensités. — On peut évaluer approximativement l'intensité relative de la force magnétique dans les différents points du barreau ; il suffit de mesurer les poids de fer que ces points peuvent supporter : ces différents poids sont la mesure proportionnelle de l'intensité du magnétisme dans les points correspondants. Si sur les différents points de la ligne OX (fig. 413), qui représente l'axe du barreau, on élève des perpendiculaires proportionnelles aux poids observés et qu'on réunisse les extrémités par un trait continu, on aura une courbe AMB connue sous le nom de *courbe des intensités*, et que l'on peut d'ailleurs déterminer par des procédés plus rigoureux que celui que nous indiquons ici. Elle se compose de deux branches AM et BM tout à fait pareilles, ce qui indique une parfaite symétrie dans les intensités. Dans la figure on a donné une disposition inverse aux deux parties de la courbe, afin de rappeler les propriétés opposées des deux pôles que nous ferons connaître tout à l'heure. Lorsqu'il s'agit de barreaux semblables, mais de longueurs différentes, on reconnaît que la courbe des intensités reste la même, elle ne fait pour ainsi dire que se déplacer à mesure que la longueur du barreau augmente. Cela veut dire que la région tout à fait neutre est d'autant plus étendue que le barreau est plus long ; c'est ce que nous avons déjà remarqué.



Fig. 413. — Courbe des intensités.

489. Aiguille aimantée. — Une aiguille aimantée n'est autre chose qu'un barreau aimanté dont la forme peut être quelconque. Assez ordinairement toutefois elle est formée d'une mince lame d'acier taillée en losange allongé ; elle porte en son milieu un petit godet ou *chape* par laquelle elle peut être suspendue sur un pivot.

Si la chape est placée de façon que l'aiguille montée sur son pivot soit horizontale, on remarque qu'elle n'est point en équilibre dans une position quelconque, elle se fixe dans une position déterminée à laquelle elle revient constamment si on l'en écarte. Dans cette position, l'une des extrémités se tourne *à peu près* vers le nord, c'est le *pôle nord* ou *pôle austral;* l'extrémité opposée, qui se tourne à peu près vers le sud, s'appelle *pôle sud* ou *pôle boréal*. C'est sur cette importante propriété qu'est fondée la boussole. Ordinairement les aiguilles de boussole, primitivement trempées avec assez de force, sont recuites jusqu'à ce qu'elles aient pris une teinte bleue très-prononcée. Cette teinte est conservée sur la moitié de l'aiguille qui se tourne vers le nord; on l'enlève sur l'autre moitié, qui prend ainsi la teinte grise naturelle de l'acier.



Fig. 414. — Aiguille aimantée.

490. Déclinaison. — En réalité le pôle austral de l'aiguille aimantée ne se tourne pas exactement vers le nord, il s'en écarte d'une certaine quantité variable d'un lieu à l'autre, et dans le même lieu d'une époque à une autre. Cette différence porte le nom de *déclinaison;* elle peut être orientale ou occidentale. A Paris, en ce moment, la déclinaison est occidentale et égale à 19° environ; le plan vertical qui contient l'aiguille aimantée s'appelle *plan du méridien magnétique;* il fait avec le plan méridien du lieu un angle qui est précisément l'angle de déclinaison.

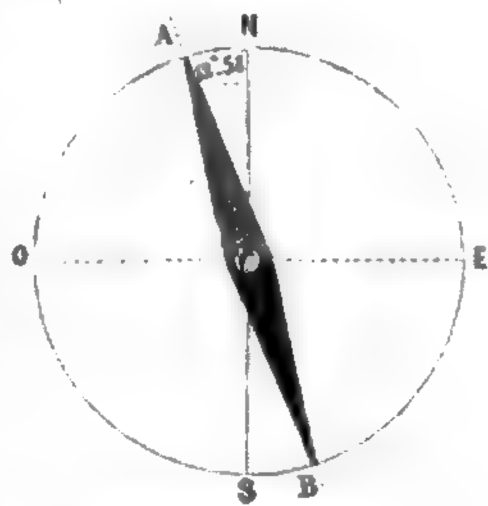
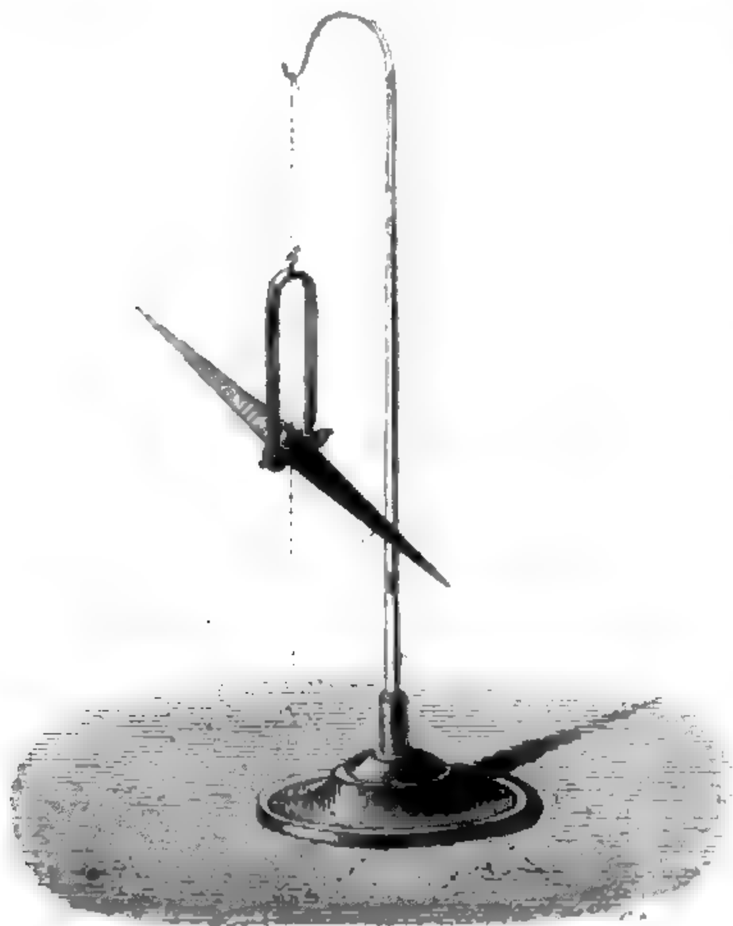


Fig. 415. — Déclinaison.

491. Inclinaison. — Si avant d'aimanter une aiguille d'acier on la fait traverser par un axe qui passe par son centre de gravité, et qu'on suspende celui-ci à un fil sans torsion, l'aiguille devra se maintenir horizontale et en équilibre dans une position quelconque.

Si alors on vient à l'aimanter, on reconnait que l'aiguille cesse d'être indifféremment en équilibre dans toutes les positions; elle s'oriente dans le plan du méridien magnétique et ne conserve pas d'ailleurs dans ce plan une position horizontale (fig. 416). La portion qui se tourne vers le nord s'incline au-dessous de l'horizon et fait avec ce dernier un angle qu'on appelle *inclinaison*. L'inclinaison varie comme la déclinaison; elle est à Paris actuellement égale à 66°.


Fig. 416. — Inclinaison.

Il suit de cette circonstance que, si l'on veut qu'une aiguille aimantée suspendue sur un pivot se maintienne horizontale, il faut que le pivot ne passe pas par le centre de gravité et qu'il y ait un peu moins de matière du côté qui tend à s'incliner sous l'horizon; les aiguilles ainsi construites portent le nom d'*aiguilles de déclinaison*.

492. Actions réciproques des pôles. — Lorsqu'on approche des extrémités d'une aiguille aimantée suspendue sur un pivot les pôles d'un autre aimant, on reconnait qu'il y a attraction ou répulsion, suivant que les pôles en regard sont de nom contraire ou de même nom. *Les pôles de nom contraire d'un aimant s'attirent; les pôles de même nom se repoussent.*

Cette propriété fournit le moyen de distinguer un corps simplement magnétique d'un corps aimanté. Le premier est attirable indifféremment aux deux pôles d'un aimant, tandis que le second présente deux pôles dont l'un est attiré et l'autre repoussé. Les attractions et les répulsions magnétiques se produisent d'ailleurs sans modification à travers un milieu quelconque, pourvu qu'il ne soit pas magnétique.

493. Aimantation par influence. — Lorsqu'un morceau de fer est au contact ou seulement soumis à l'influence d'un barreau

aimanté, il devient lui-même un aimant avec une région moyenne et deux pôles. Si, en effet, comme le montre la figure 417, on projette sur lui de la limaille, on voit celle-ci adhérer seulement aux



Fig. 417. — Aimantation par influence.

extrémités. Si l'on enlève l'aimant inducteur, la limaille retombe et le fer n'a plus aucune aimantation appréciable. En employant l'acier au lieu du fer, on obtient un résultat analogue, mais toutefois avec une différence très-importante. D'une part, l'acier s'aimante moins et plus difficilement que le fer, mais, d'autre part, l'aimantation persiste après que l'influence a cessé. La cause à laquelle on attribue cette propriété spéciale de l'acier a été désignée sous le nom de *force coercitive*. Quand le fer est bien pur, qu'il est bien exempt d'aciération, il est tout à fait dépourvu de force coercitive : on l'appelle *fer doux*.



Fig. 418. — Chaîne magnétique.

Dans l'aimantation par influence on peut facilement reconnaître que le pôle qui est en regard du pôle inducteur a un nom contraire à ce dernier; il s'ensuit une action attractive mutuelle, à raison de laquelle le morceau de fer peut être supporté par l'aimant; mais le fer aimanté peut à son tour soutenir un deuxième morceau de fer et ainsi de suite (fig. 418) en formant une chaîne magnétique.

C'est en réalité par un mécanisme analogue que se forment les houppes de limailles adhérentes à un barreau aimanté; elles sont en effet constituées par une série successive de grains, dont chacun, à raison de son aimantation temporaire, attire et retient au contact le suivant.

En comparant les phénomènes précédents à ceux de l'électrisation par influence, on reconnaît entre eux une certaine analogie, mais avec une différence considérable. En effet, dans le cas des corps électrisés, il y a communication de l'électricité d'un corps à l'autre quand ceux-ci viennent au contact. Dans l'aimantation rien de pareil ; que l'action ait eu lieu au contact ou à distance, l'aimant conserve toujours son intensité initiale. On doit conclure de là que, si, comme le supposait Coulomb, les phénomènes magnétiques doivent être attribués, comme les phénomènes électriques, à un fluide, celui-ci ne saurait passer d'un corps à l'autre.

494. Effet de la rupture d'un barreau aimanté. — L'expérience suivante permet d'aller plus loin. Si l'on vient à briser un barreau aimanté AB en plusieurs fragments, chacun d'eux devient un aimant complet avec les pôles disposés comme le montre la figure 419.

Comme l'on peut imaginer que la division soit poussée jusqu'à la dernière limite possible, on doit se représenter un aimant quelconque comme le résultat de la juxtaposition d'un certain nombre d'*éléments magnétiques* complets, indépendants, ayant chacun un

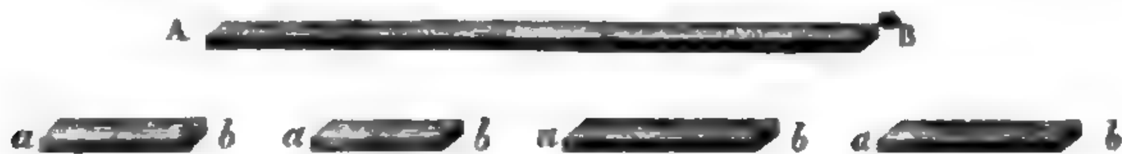


Fig. 419. — Rupture d'un barreau aimanté.

pôle austral et un pôle boréal et orientés tous de la même manière. Quant à la constitution des éléments magnétiques, elle a été l'objet de diverses hypothèses; nous verrons plus loin celle qui a été imaginée par Ampère et qui est fondée sur les propriétés des courants électriques.

CHAPITRE XLIV.

FORCE DIRECTRICE DU GLOBE.

495. La force qui oriente l'aiguille aimantée est purement directrice. — La direction que prend l'aiguille aimantée abandonnée à elle-même est connue depuis longtemps, et on a fait sur son origine diverses hypothèses qu'il est inutile de rappeler ici. Aujourd'hui les physiciens s'accordent à admettre que c'est une action terrestre. Notre globe renferme en effet une quantité considérable de substances magnétiques; toutes les substances d'ailleurs sont susceptibles d'agir d'une manière ou d'une autre sur l'aiguille aimantée (504), il doit donc y avoir un effet résultant de même qu'il y a une résultante des actions attractives du globe qui produit le poids. Toutefois cette résultante n'est pas, dans le cas des aimants, une force proprement dite, elle ne tend pas à les déplacer dans l'espace, elle a seulement pour résultat de les diriger, de les orienter. C'est donc une force purement directrice; en d'autres termes, c'est ce qu'en mécanique on appelle un *couple* (14).

Cette importante proposition se démontre rigoureusement à l'aide des expériences suivantes :

1° On pèse très-exactement un barreau d'acier avant qu'il soit aimanté, on le pèse après l'aimantation et on trouve rigoureusement le même poids. L'action terrestre, quelle qu'elle soit d'ailleurs, n'a donc pas de composante verticale.

2° On suspend librement et par son milieu, à un fil très-fin, un barreau d'acier non aimanté; le fil prend naturellement une direction verticale. Si on vient alors à aimanter le barreau, celui-ci

s'oriente d'une façon déterminée dans l'espace; mais les mesures les plus rigoureuses permettent de constater que, lorsque l'équilibre est établi, le fil a conservé exactement la direction verticale. Donc l'action terrestre n'a pas non plus de composante horizontale.

3° Si l'on place une aiguille aimantée sur un morceau de liége flottant sur l'eau, le système tourne jusqu'à ce que l'aiguille soit dans le méridien magnétique; à partir de ce moment il n'y a plus aucun mouvement.

496. Couple terrestre. — On doit donc considérer une aiguille aimantée comme soumise à l'action de deux forces égales, parallèles et dirigées en sens contraire; leur ensemble constitue le *couple terrestre* ou le couple directeur.

Ces forces sont évidemment les résultantes des actions terrestres sur chacun des petits aimants particulaires dont la réunion forme un aimant quelconque. Les points d'application de ces résultantes sont ce que l'on appelle, d'une manière précise, les *pôles* de l'aimant. Ainsi définis, les pôles sont des points déterminés et uniques; mais il importe de remarquer que cette détermination tient uniquement à l'hypothèse d'actions émanées de points très-éloignés et par suite parallèles entre elles. Si deux aimants sont dans le voisinage l'un de l'autre, les aimants particulaires donnent lieu à des forces mutuelles de directions et d'intensités très-diverses, et rien n'autorise à admettre, comme on le fait souvent, que ces actions si multiples se réduisent à des forces attractives et répulsives passant par les pôles; ce ne peut être là tout au plus qu'une grossière approximation. La direction et le point d'application des forces résultantes, dans ce cas, dépendent évidemment de la disposition relative des barreaux.

Mais dans le cas où il s'agit d'actions éloignées, et particulièrement des actions terrestres, quelle que soit la position du barreau, la résultante conserve et la même direction et la même intensité, de même que son point d'application demeure invariable. Il suit de cette remarque, que si l'on vient à écarter une aiguille aimantée de sa position d'équilibre dans le méridien magnétique, elle tendra à y revenir, sollicitée par une force qui, appliquée au même point,

conserve la même direction et la même intensité. La portion de cette force qui produit effectivement le mouvement est la composante suivant la tangente; elle est par conséquent proportionnelle au cosinus de l'angle que fait cette tangente avec la direction de la force, ou, ce qui est la même chose, au sinus de l'angle d'écart.

497. Balance magnétique. — Coulomb a démontré expérimentalement ce fait à l'aide de la balance de torsion, légèrement modifiée pour l'approprier à l'étude des phénomènes magnétiques (fig. 420). La disposition générale est la même que pour l'électricité, seulement la petite pièce métallique qui termine le fil est remplacée par une autre ayant la forme d'un étrier; sur cet étrier on pose le barreau aimanté de façon qu'il se place sans torsion dans le méridien magnétique et en face du zéro de la division angulaire tracée sur la caisse. Pour atteindre ce résultat, on commence par suspendre le barreau à un fil sans torsion; il se place naturellement dans le méridien magnétique et on tourne la caisse de façon à placer le zéro dans ce méridien; on remplace alors le fil sans torsion par un fil métallique et le barreau aimanté par une règle de cuivre; celle-ci se place dans une position d'équilibre qui correspond évidemment à l'absence de torsion du fil, on tourne alors le bouton supérieur et on amène la règle dans le méridien magnétique; on la remplace enfin par le barreau aimanté, qui se trouve ainsi dans le méridien magnétique et sans aucune torsion du fil. L'appareil ainsi préparé, on tourne le micromètre supérieur, ce qui a pour résultat de tordre



Fig. 420. — Balance magnétique.

le fil et par suite de faire sortir le barreau du méridien magnétique. Or, si dans diverses expériences successives on compare les torsions effectives aux déviations de l'aiguille, on trouve qu'elles sont proportionnelles aux sinus des angles de déviation.

498. Aimant terrestre. — On peut attribuer le couple terrestre à l'action d'une sorte d'aimant $\pi\pi'$ (fig. 421) qui passerait par le centre du globe, aurait une petite longueur et ferait avec l'axe terrestre un angle d'une vingtaine de degrés; c'est ce que l'on appelle l'*aimant terrestre*. Dans un point quelconque du globe, le méridien magnétique sera le plan vertical contenant l'axe AB; or, pour tous les points du grand cercle, qui contient à la fois l'axe géographique PP′ et l'axe magnétique, le méridien magnétique coïncide avec le méridien géographique, et par suite la déclinaison doit être nulle. Pour tout autre point quelconque M les deux méridiens doivent faire un angle qui est précisément l'angle de déclinaison. De part et d'autre du grand cercle, où la déclinaison est nulle, la déclinaison doit être de sens contraire. Si on conçoit, d'autre part, le grand cercle $\varepsilon\varepsilon'$, perpendiculaire à l'axe $\pi\pi'$, en tous ses points l'aiguille librement suspendue devra se placer parallèlement à l'axe, et par conséquent l'inclinaison devra y être nulle; c'est ce que l'on appelle l'*équateur magnétique*. On voit qu'il doit former un grand cercle incliné d'une vingtaine de degrés sur l'équateur géographique EE′. Si on s'avance vers le pôle B, l'aiguille s'inclinera de plus en plus; au point B elle devra être verticale. Au même point, l'aiguille de déclinaison ne sera soumise à aucune force directrice; la même chose aurait lieu au point A : ce sont les deux pôles magnétiques du globe.

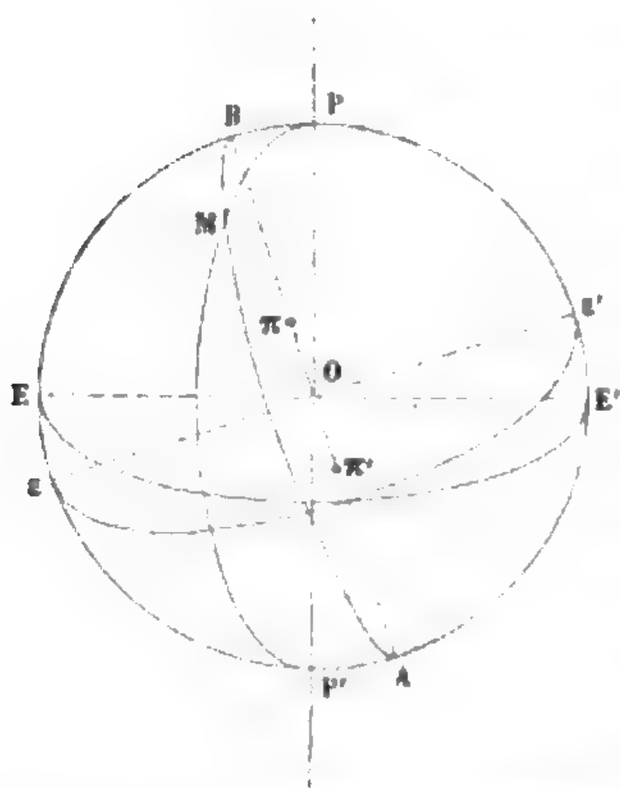


Fig. 421. — Théorie du magnétisme terrestre.

Ces conséquences de l'hypothèse de l'aimant terrestre sont vérifiées par l'expérience dans leur sens général, toutefois avec des irrégularités qui ne permettent pas d'admettre une symétrie aussi

parfaite que celle que nous avons supposée. Il ne paraît pas possible en particulier d'expliquer tous les phénomènes avec deux centres magnétiques, il faut en admettre au moins un troisième dans l'hémisphère austral.

499. Mesure de la déclinaison. — La mesure de la déclinaison est au fond une opération astronomique, dont nous nous bornerons à donner le principe. L'instrument dont on se sert est formé essentiellement d'une aiguille de déclinaison mobile sur un cercle divisé M. Sur ce cercle sont fixés deux montants verticaux portant une lunette LL' mobile autour de l'axe horizontal *aa'*; l'horizontalité de l'axe est accusée par le niveau à bulle NN et peut être d'ailleurs obtenue par le jeu des vis calantes qui supportent l'appareil. Le plan vertical dans lequel se meut la ligne de visée de la lunette contient la ligne 0 — 180, ordinairement marquée *ns*, de la graduation du cercle. Enfin le limbe, avec toutes les parties qu'il supporte, est lui-même mobile sur le cercle divisé PQ. Cela posé, pour observer la déclinaison, on vise avec la lunette un astre déterminé et dont les éléments astronomiques sont connus. Ces éléments permettent de calculer, d'après l'heure de l'observation, l'angle qui sépare le plan vertical de l'astre du plan méridien; il n'y a donc qu'à faire tourner le limbe sur le cercle divisé d'une quantité égale à cet angle, la ligne 0 — 180 se trouvera ainsi dans le méridien et la déclinaison pourra être lue directement.

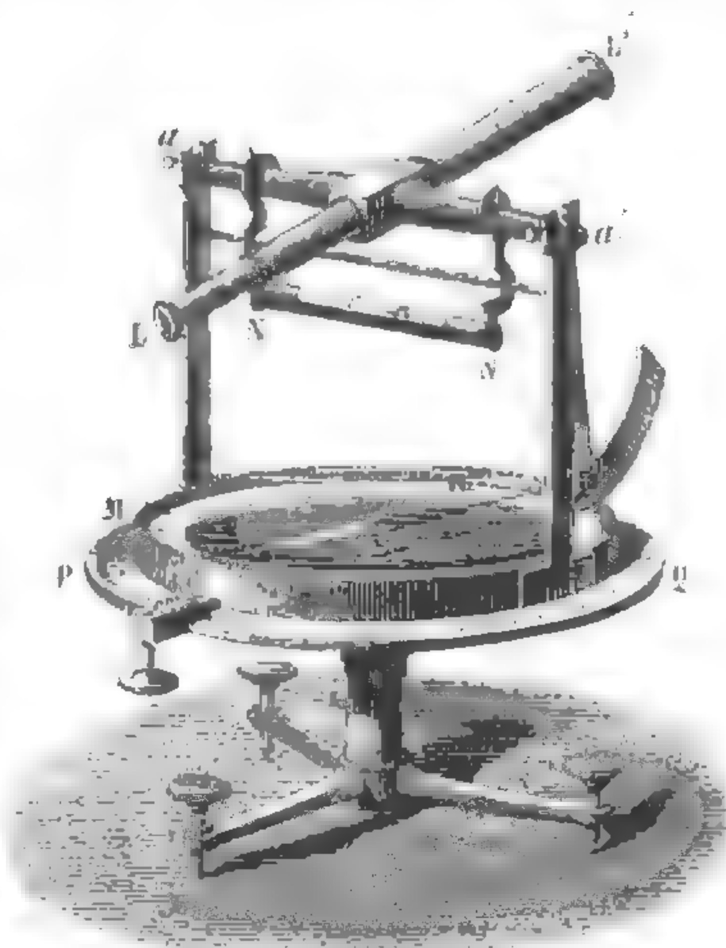


Fig. 422. — Boussole de déclinaison.

500. Mesure de l'inclinaison. — La boussole d'inclinaison se compose d'un cercle vertical divisé (fig. 422), en regard duquel se meut une aiguille aimantée mobile autour d'un axe horizontal qui passe par son centre de gravité; le cadre qui supporte ce cercle peut

être placé dans tous les azimuts possibles par des rotations dont la valeur se mesure sur un cercle divisé. On voit d'après cette disposition que, si on pouvait placer le cercle mobile dans le plan du méridien magnétique, l'aiguille se mouvrait librement dans ce plan et donnerait directement l'inclinaison. On peut arriver à ce résultat à l'aide de la remarque suivante : Supposons le plan du limbe exactement perpendiculaire au méridien magnétique, l'aiguille se trouve soumise à deux forces agissant dans un plan perpendiculaire à celui dans lequel elle peut se mouvoir; elle se placera donc nécessairement suivant l'intersection des deux plans, qui est une ligne verticale. Réciproquement, si on fait tourner le limbe jusqu'à ce que l'aiguille soit verticale, on sera sûr qu'il se trouve dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique; il suffira alors, par conséquent, de le faire tourner de 90° pour le placer dans le méridien magnétique et pouvoir lire directement l'inclinaison.

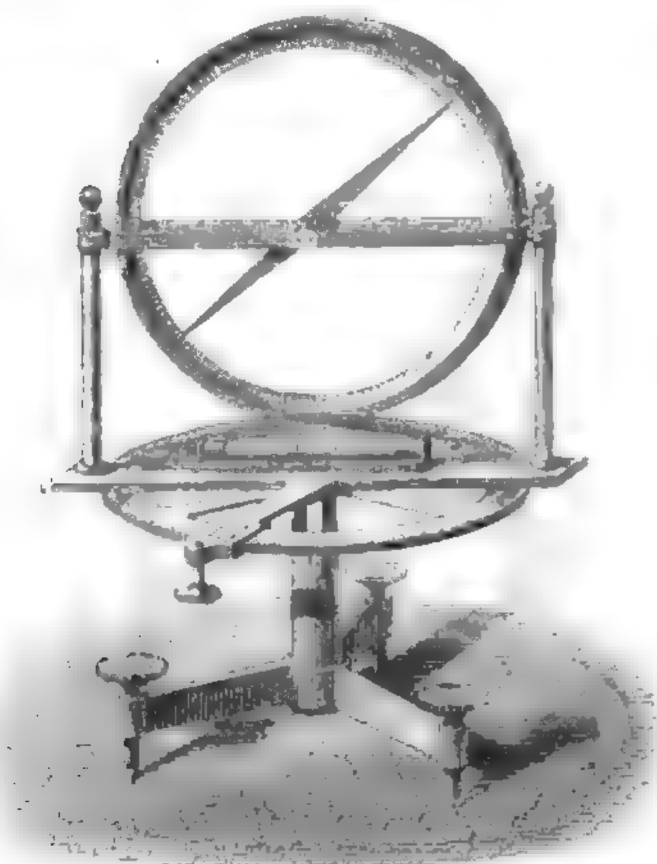


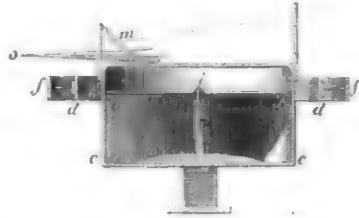
Fig. 423. — Boussole d'inclinaison.

501. Variations de la déclinaison et de l'inclinaison. — La déclinaison et l'inclinaison varient d'un lieu à l'autre, ainsi que cela a été indiqué plus haut; elles varient aussi dans le même lieu avec le temps. Ainsi, à l'époque des plus anciennes observations faites à Paris en 1580, la déclinaison était de 11° 30′ à l'est; en 1663 l'aiguille se dirigeait droit au nord; Paris était donc sur la ligne sans déclinaison. Depuis cette époque la déclinaison est devenue occidentale et elle a augmenté jusqu'en 1814, où elle a atteint une valeur maxima de 22° 34′; à partir de ce moment elle diminue graduellement et est en ce moment égale à 19° environ.

Quant à l'inclinaison, depuis 1671 où on a commencé à l'observer, elle n'a cessé de diminuer à Paris; de 75° elle est tombée à 66°, sa valeur actuelle. Les variations observées depuis 1863

étant à peine sensibles, on peut supposer que la valeur actuelle est une valeur minima qui sera suivie d'un mouvement ascendant.

502. Boussole. — La boussole marine, que l'on appelle simplement *la boussole*, présente quelques particularités de construction en rapport avec son objet spécial. Elle se compose d'une boîte *c* lestée et suspendue suivant le système de Cardan par le moyen de deux axes *tt* et *uu* indépendants et rectangulaires. Dans l'intérieur de cette boîte repose sur un pivot *i* un disque de talc ou de mica sur lequel se trouve collée l'aiguille aimantée *ab*. Le disque est divisé quelquefois en degrés, plus souvent il porte la figure de la rose des vents (fig. 425) et l'aiguille se trouve appliquée le long de la ligne principale marqué NS. L'appareil est ordinairement installé sur le pont, sous les yeux du timonier qui tient en main la roue du gouvernail. Suivant la direction d'une ligne *ff* tracée sur la boîte, qu'on appelle *ligne de foi* et qui n'est autre chose que celle de l'axe du navire, un petit miroir placé en *m* permet au timonier placé en *o* de voir à chaque instant l'image de la division qui est placée sur l'axe et par conséquent l'angle que fait l'axe du navire avec la direction de l'aiguille aimantée, et par suite avec le méridien, en tenant compte de la déclinaison. Si l'on pouvait



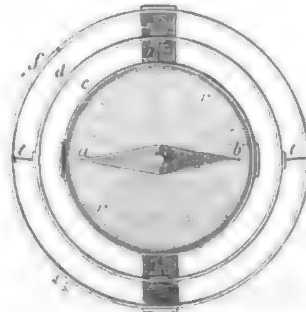


Fig. 424. — Boussole marine.

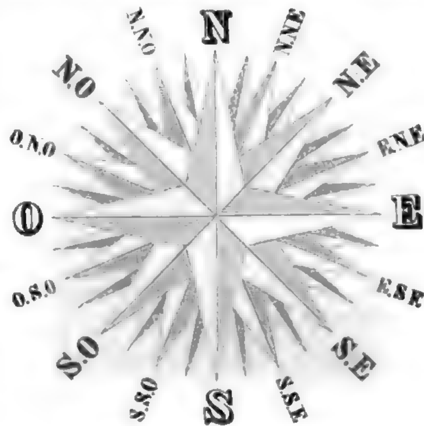


Fig. 425. — Rose des vents.

négliger le mouvement latéral, c'est-à-dire la dérive, cette donnée serait la seule nécessaire pour faire la route. En effet, les marins se servent de cartes faites suivant la projection de Mercator (fig. 426), dans lesquelles les méridiens et les parallèles sont formés de deux systèmes de lignes droites parallèles entre elles. On sait d'ailleurs que dans ce système les angles formés sur la carte sont égaux aux angles réels sur la terre. Il suit de là que, si on mène une ligne droite sur la carte d'un point A à un autre point B, cette droite AB fera le même angle avec tous les méridiens, de sorte que, si on s'assujettit dans la route à faire constamment cet angle, on aura effectué le trajet entre les deux points. Il est vrai qu'on n'aura pas suivi le plus court chemin, mais c'est là un inconvénient très-léger comparativement à la simplicité de la méthode employée.

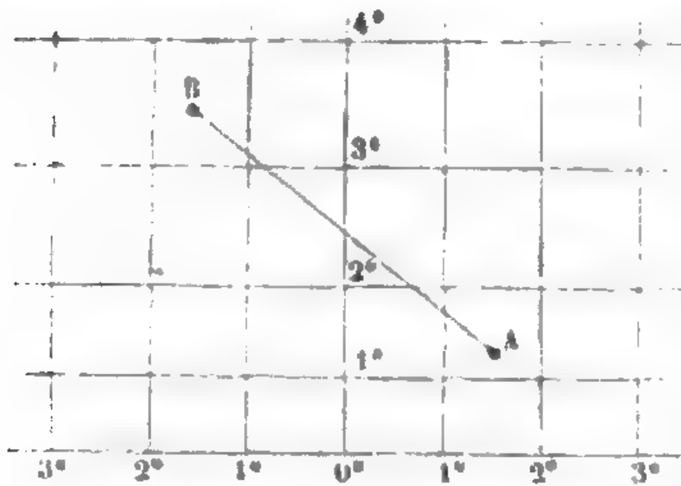


Fig. 426. — Carte marine.

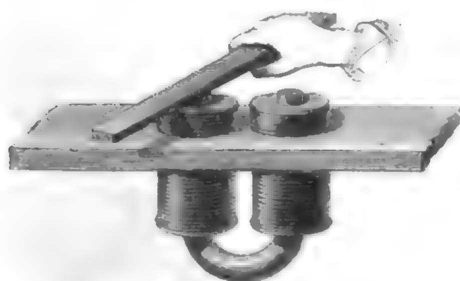
On voit que l'*angle de route* que le timonier doit maintenir pourrait être déterminé au départ une fois pour toutes, mais l'influence de la dérive donne lieu à des modifications que l'on calcule d'après l'observation directe de la marche latérale.

L'origine de la boussole est très-obscure ; les anciens, qui connaissaient la pierre d'aimant, ignoraient sa vertu directrice ; c'est dans le cours du XIIIe siècle que l'instrument a été connu et employé en Europe.

503. Procédés d'aimantation. — Le procédé général pour aimanter un barreau consiste à le frotter durant un temps convenable contre un barreau déjà aimanté. Avant que l'on connût les aimants temporaires que l'on peut obtenir aujourd'hui avec l'électricité et qui peuvent avoir, pour ainsi dire, telle force que l'on veut, on avait imaginé diverses méthodes appelées *simple touche, double touche,* etc., et qui sont complétement tombées en désuétude. On emploie aujourd'hui à peu près exclusivement dans les ateliers les deux méthodes suivantes :

1° On se sert d'un électro-aimant fixe (fig. 427), sur les pôles

duquel on fait glisser, alternativement et en sens contraire, le barreau à aimanter. L'effet de cette friction est de développer à l'extrémité qui abandonne l'aimant un pôle de nom contraire à celui qui agit, d'où l'on voit que les frictions inverses sur les deux pôles tendent à produire une aimantation dans le même sens.



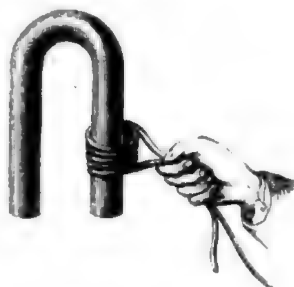


Fig. 427. Procédés d'aimantation. Fig. 428.

2° Quand on veut produire une aimantation assez énergique, l'électro-aimant doit être puissant, et dès lors l'adhérence du barreau est telle, que l'opération devient incommode. D'ailleurs le barreau peut se trouver fortement rayé par la friction. On préfère dans ce cas faire mouvoir le long du barreau une bobine (fig. 428) traversée par un courant. C'est le procédé d'Arago et d'Ampère, sur lequel nous reviendrons plus loin.

La terre agissant à la manière d'un aimant, il en résulte que les différents corps magnétiques, et particulièrement le fer et l'acier, éprouvent une aimantation temporaire ou permanente provenant

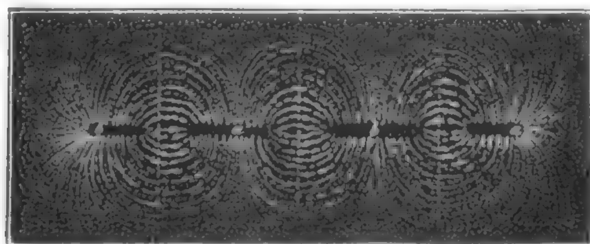


Fig. 429. — Points conséquents.

de l'action du globe. Les pôles des aimants ainsi formés dépendent de la position des corps par rapport au méridien magnétique.

Il arrive fréquemment, quand on veut aimanter fortement un

barreau, qu'on obtienne plus de deux pôles; les pôles supplémentaires portent le nom de *points conséquents;* cette circonstance est généralement fâcheuse, et on doit autant que possible l'éviter. La figure 429 représente l'expérience des spectres magnétiques faite avec un barreau ayant des points conséquents.

La force des aimants dépend en général de leur volume; d'autre part, on a reconnu que les petits aimants ont proportionnellement une force plus grande que les gros; de là l'idée qu'on a eue de former des faisceaux magnétiques en réunissant un certain nombre d'aimants par leurs pôles semblables. La figure 430 représente un faisceau de ce genre. Les aimants réunis par groupes de trois forment les faisceaux partiels; les deux extrémités sont armées de masses de fer doux qui constituent les pôles du système.

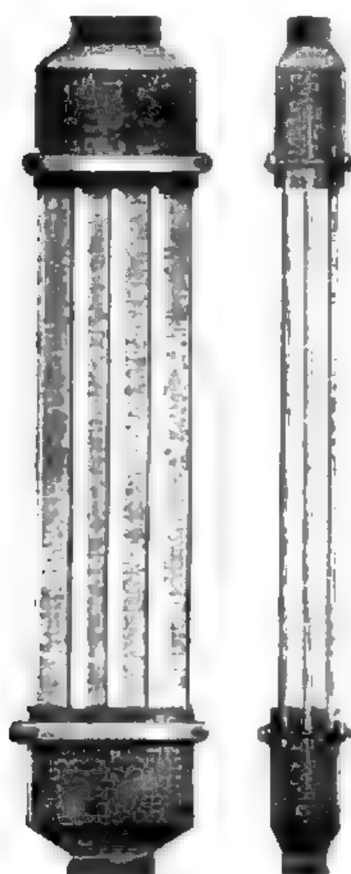


Fig. 430. — Faisceau d'aimants.



Fig. 431. — Aimant en fer à cheval.

La figure 431 représente un aimant en fer à cheval dont les pôles N et S supportent une armature en fer doux, à laquelle est suspendue un vase destiné à recevoir des poids. On peut, en ajoutant chaque jour un poids nouveau, développer graduellement la force portative de l'aimant; c'est ce que l'on appelle *nourrir l'aimant;* mais, chose curieuse, si le plateau vient à se détacher, l'aimant reprend son intensité initiale.

On s'est beaucoup occupé autrefois des moyens d'obtenir des aimants d'une grande force; ces recherches sont à peu près abandonnées aujourd'hui que l'on peut obtenir par le moyen de l'électricité des aimants temporaires d'une force pour ainsi dire illimitée.

504. Action du magnétisme sur tous les corps. — On a reconnu depuis longtemps que le fer et l'acier ne sont pas les seules substances sensibles à l'action de l'aimant : le nickel et le cobalt partagent cette propriété. La possibilité d'obtenir aujourd'hui des aimants d'une très-grande puissance avec l'électricité a permis de reprendre utilement l'étude de l'action du magnétisme sur tous les corps. On se sert de l'appareil représenté par la figure 432. Il se compose de deux puissantes bobines BB dont les noyaux en fer

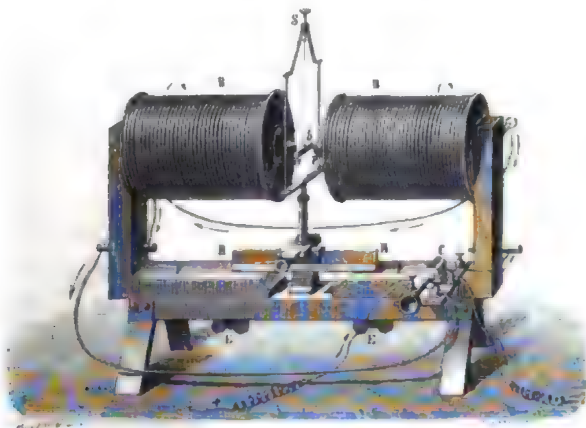


Fig. 432. — Appareil pour le diamagnétisme.

doux se recourbent à leur partie postérieure et se terminent par les parties F qui peuvent se placer à une distance variable l'une de l'autre ; elles sont maintenues dans la position convenable par les écrous EE. Les armatures P présentent la forme de cônes émoussés, ce qui a l'avantage de mieux concentrer à leurs extrémités la puissance magnétique.

Pour étudier l'action du magnétisme sur une substance, on taille celle-ci en forme de barreau *ab* et on la suspend, à l'aide d'un support spécial RS, entre les deux pôles P. Si on vient à faire passer le courant et que la substance soit magnétique, on voit le barreau se diriger suivant la ligne des pôles ; il forme alors un petit aimant dont les pôles se placent naturellement en regard des pôles contraires de l'aimant B. Or, si l'aimant agissant est assez fort, on reconnait que toutes les substances sont sensibles à son action,

toutefois avec une différence curieuse et imprévue. Lorsque la substance n'est pas magnétique, le barreau se place dans une position axiale, c'est-à-dire perpendiculaire à la ligne des pôles. Les substances qui présentent cette particularité sont appelées diamagnétiques. Parmi les corps simples solides, les seuls qui soient magnétiques sont les suivants :

Fer.	Manganèse.	Lanthane.
Nickel.	Chrome.	Molybdène.
Cobalt.	Uranium.	Titane.

Tous les autres sont diamagnétiques.

Les composés d'éléments magnétiques, par exemple les oxydes, les sulfures de métaux magnétiques, sont ordinairement magnétiques.

Les composés résultant de l'union d'un élément magnétique avec un élément diamagnétique sont magnétiques si l'élément magnétique est un métal. Les oxydes des métaux diamagnétiques sont diamagnétiques.

Avec quelques modifications dans le procédé opératoire, on peut constater le magnétisme ou le diamagnétisme des liquides et même des gaz. Parmi ces derniers l'oxygène seul est magnétique. Ce fait résulte de ce que toutes les attractions que présentent les corps magnétiques sont plus fortes quand on les mesure dans le vide que dans l'air, ce qui ne peut s'expliquer qu'en admettant une action magnétique dans le milieu ambiant.

CHAPITRE XLV.

DE LA PILE ET DU COURANT.

505. Électricité dynamique. — A la fin du dernier siècle, au moment où, après la découverte successive des divers phénomènes électriques, Coulomb venait d'en établir les lois par la méthode expérimentale et de fonder, à vrai dire, la théorie physique de l'électricité, un instrument nouveau, dû au génie de Volta, vint changer complétement la face de cette science. Au lieu d'un agent d'un maniement difficile et capricieux comme l'électricité ordinaire, se dissipant dans l'air avec une désespérante facilité, qu'on ne peut d'ailleurs produire que péniblement en quantité un peu grande, les physiciens trouvèrent dans la pile une source continue d'électricité facile à produire, facile à préserver de la déperdition, donnant lieu d'ailleurs à l'observation d'une série de phénomènes entièrement nouveaux. L'importance et la variété de ces phénomènes, le caractère des applications qui ne tardèrent pas à en être faites eurent pour résultat de rejeter, pour ainsi dire, au second plan, et comme d'un intérêt médiocre, les recherches sur l'électricité ordinaire. Les efforts des savants se portèrent tous sur cette nouvelle branche de la physique, qui a acquis en peu d'années un développement des plus considérables.

Elle porte le nom d'*électricité dynamique*, par opposition à celui d'*électricité statique*, qui s'applique aux faits qui ont été étudiés dans les chapitres précédents. Il est facile de justifier ces expressions par les considérations suivantes. En effet, dans les divers appareils de l'électricité statique, on commence toujours par accumuler une

quantité plus ou moins considérable de fluide positif et de fluide négatif sur des conducteurs déterminés, et c'est après cette accumulation qu'on provoque leur réunion de manière à produire une décharge. Cette combinaison des fluides est un véritable phénomène de mouvement, soit qu'il se produise dans la totalité des chaînes conductrices deux courants inverses, soit, ce qui est plus probable, que la transmission résulte de la décomposition de molécule à molécule. Dans la bouteille de Leyde ce phénomène spécial ne dure qu'un instant. Dans les conducteurs opposés de la machine de Holtz, il y a une série de décharges qui se succèdent avec une très-grande rapidité et qui entretiennent les conducteurs dans cet état particulier dont nous parlons. Toutefois, si rapprochées que soient ces décharges, elles sont distinctes et résultent toujours de la production *antérieure* d'une certaine quantité d'électricité. Si l'on imagine que cette production antérieure n'existe pas, que rigoureusement et d'une manière continue les électricités contraires se réunissent dans l'intérieur du fil conducteur, ce fil se trouve dans un état particulier. Il n'est pas électrisé à la manière ordinaire, il n'attire pas les corps légers, il ne donne pas lieu à la production d'une étincelle; toutefois il n'est pas à l'état naturel, car si on l'approche d'une aiguille aimantée, il produit sur elle une déviation. Le phénomène spécial dont le fil est le siége se nomme *courant*, il est caractérisé par le mouvement continu des fluides, c'est-à-dire par l'état dynamique de l'électricité, et on voit que l'une de ses propriétés caractéristiques est de dévier l'aiguille aimantée.

506. Élément rhéomoteur ou producteur d'un courant. — Pour réaliser les conditions qui viennent d'être indiquées, on a recours à l'électricité qui se produit dans les actions chimiques. On sait, et nous reviendrons plus loin sur ce sujet, que toute action chimique s'accompagne d'un développement de chaleur et d'électricité; en d'autres termes, le travail mécanique consommé dans les chocs des particules se transforme soit en chaleur, soit en électricité. En particulier, quand dans un milieu conducteur on fait agir l'un sur l'autre un acide et une base, l'acide s'électrise positivement et la base négativement. De même, quand un métal est

attaqué par un acide, celui-ci s'électrise positivement, tandis que le métal s'électrise négativement.

Cela posé, supposons que dans un vase (fig. 433) contenant de l'eau acidulée à l'aide de l'acide sulfurique, par exemple, on place à côté l'une de l'autre deux lames, l'une de zinc Z, c'est-à-dire d'un métal attaquable par l'eau acidulée, l'autre de cuivre C ou de tout autre métal non attaquable. Supposons, en outre, qu'un fil conducteur M réunisse les deux lames au dehors du liquide. Au contact du zinc et de l'eau acidulée, il se produit une action chimique dont le résultat est la production de l'hydrogène et du sulfate de zinc. Le zinc s'électrise négativement et le fluide négatif peut être considéré comme se répandant dans le fil extérieur. Quant à l'électricité positive, elle se répand du cuivre dans le même fil en suivant une marche inverse. Il y a donc dans le fil extérieur réunion des deux fluides contraires. Cette réunion s'effectue d'une manière continue, sans qu'il y ait possibilité d'accumulation préalable : c'est le caractère décisif de ce que nous appelons un courant. Le fil jouit en effet de la propriété de dévier l'aiguille aimantée.

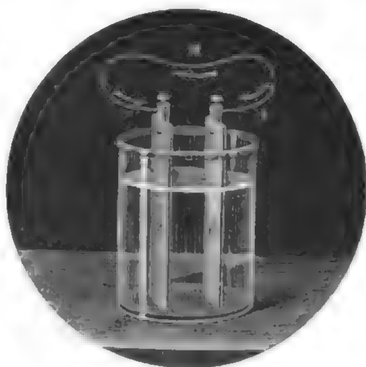


Fig. 433. — Élément rhéomoteur.

L'appareil que nous employons pour la production du courant se nomme un *élément rhéomoteur* ou un *élément de pile*.

507. Sens du courant. — Le phénomène complexe du courant électrique résulte de deux mouvements contraires de l'électricité. Toutefois il a par lui-même un sens déterminé, car l'aiguille aimantée, comme nous le verrons plus loin, est déviée, non pas d'une manière quelconque, mais d'une façon qui dépend de la disposition mutuelle des lames de l'élément rhéomoteur. Nous ne sommes pas néanmoins en mesure d'assigner l'analogie qui peut exister entre le phénomène du courant électrique et un courant ordinaire. L'expression employée n'a en réalité d'autre but que d'accuser un sens. Pour la précision du langage on est convenu d'ap-

peler sens du courant le sens du mouvement de l'électricité positive ; ce sens est marqué dans la figure par des flèches.

508. Pile. — Supposons maintenant (fig. 434) qu'on place à la suite les uns des autres un certain nombre d'éléments en faisant communiquer le cuivre du premier avec le zinc du deuxième, le cuivre du deuxième avec le zinc du troisième, etc., et qu'enfin on réunisse par un fil le cuivre du dernier élément avec le zinc du pre-

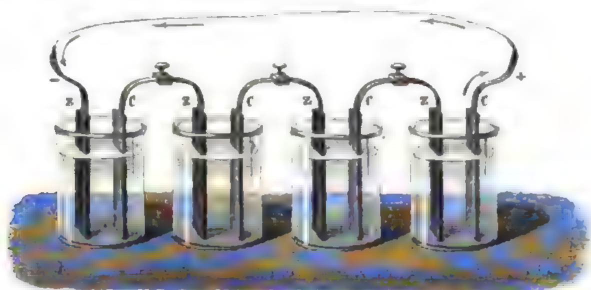


Fig. 434. — Pile.

mier; chacun des éléments agira individuellement de la façon indiquée tout à l'heure et il se produira un courant dans le système conducteur dont les autres éléments font partie. Par conséquent, dans le fil extérieur le courant sera plus intense, c'est-à-dire qu'il sera susceptible de dévier l'aiguille aimantée avec plus d'énergie ou, en général, de manifester d'une façon plus marquée les propriétés qui caractérisent sa nature physique; une pareille réunion d'éléments rhéomoteurs porte le nom de *pile*. L'extrémité par laquelle sort l'électricité positive est le pôle positif, à l'extrémité opposée se trouve le pôle négatif. Les deux fils fixés aux pôles sont souvent désignés sous le nom de *rhéophores ;* leurs extrémités, dont la réunion détermine le mouvement continu qui caractérise le courant, s'appellent *électrodes*. On emploie aussi quelquefois les mots *anode* et *cathode* pour désigner les électrodes positives et négatives.

509. Historique de la pile. — Ce n'est pas dans l'ordre d'idées qui vient d'être indiqué que s'est placé l'inventeur de la pile. Cette merveilleuse découverte a été en réalité le résultat d'expériences mal interprétées et d'une théorie qui ne saurait aujourd'hui soutenir l'examen.

Vers l'année 1780, Galvani, professeur d'anatomie à Bologne, s'occupait de quelques recherches sur l'irritabilité nerveuse des grenouilles ; l'animal était dans ce but préparé de la manière suivante : Les bras et la tête ayant été enlevés d'un coup de ciseau et les membres inférieurs rapidement dépouillés, on laisse tenir ces derniers à la partie supérieure du corps uniquement par les nerfs cruraux, qui peuvent servir ainsi à suspendre l'animal. Dans ces circonstances, Galvani reconnut que chaque fois qu'on tire une étincelle de la machine électrique la grenouille éprouve une sorte de commotion. Ce phénomène n'était autre chose qu'un choc en retour, ainsi que cela a été dit plus haut (477). Galvani en varia les conditions ; il se servit d'animaux d'espèces différentes, d'électricité empruntée à diverses sources, et c'est dans le cours de ces études, qui durèrent plusieurs années, qu'il fut conduit au fait fondamental de l'électricité voltaïque. Il reconnut (l'expérience primitive est de 1786) qu'en mettant en communication les nerfs cruraux de la grenouille avec les muscles, à l'aide d'un arc formé de deux métaux différents (fig. 435), cuivre et zinc par exemple, au moment où le contact a lieu l'animal éprouve une commotion.


Fig. 435. — Commotion de la grenouille.

Galvani eut l'occasion de remarquer plusieurs fois que le phénomène, qui se produit toujours, quelle que soit la nature de l'arc conducteur, est toutefois beaucoup plus marqué avec un arc hétérogène.

Cette circonstance, dont Volta sut tirer un si grand profit, ne parut à Galvani que d'une importance secondaire. Il attribua les phénomènes observés à un courant propre de l'animal, et ne fit jouer à l'arc métallique que le rôle de conducteur. Le courant

propre de la grenouille est aujourd'hui constaté d'une manière formelle; toutefois l'effet observé est beaucoup plus marqué que celui qu'il est exclusivement capable de produire. Cet accroissement d'effet est dû à l'action chimique de l'air ou des liquides animaux sur les métaux altérables. Mais cette action était à peine soupçonnée au temps de Galvani, et, pour se rendre compte de l'effet incontestable des métaux, Alexandre Volta, professeur à Pavie, eut recours à une doctrine qui peut paraître singulière, et qui le conduisit toutefois à la découverte de la pile.

510. Théorie de Volta. — Volta admet que l'animal, dans l'expérience de Galvani, joue un rôle purement passif, que c'est un simple électroscope. La source d'électricité se trouve, suivant lui, au contact des deux métaux différents; il y a dans ce cas une sorte de force électromotrice en vertu de laquelle le fluide neutre se décompose, et les deux métaux prennent des électricités contraires. Dans le cas particulier du zinc et du cuivre, le zinc prend l'électricité positive et le cuivre l'électricité négative. Volta démontra ce fait en se servant de l'électroscope condensateur, et d'une lame formée de zinc et de cuivre soudés. A cet effet, il prit le zinc à la main et mit en communication le cuivre avec le plateau inférieur de l'électroscope, pendant que le plateau supérieur communique lui-même avec le sol; les communications ayant été rompues, et le plateau supérieur ayant été enlevé, il reconnut que les feuilles d'or étaient chargées d'électricité négative. C'était l'électricité du cuivre, tandis que le zinc avait pris l'électricité positive.

Cette expérience de Volta, qu'il est très-facile de répéter, est due en réalité à l'action chimique de l'air ou des doigts toujours plus ou moins humides sur le zinc; c'est l'électricité négative du métal qui se transmet au plateau par l'intermédiaire du cuivre. Si, comme le faisait aussi Volta, on touchait le plateau avec le zinc, en ayant soin toutefois d'interposer entre les deux un morceau de drap imbibé d'eau acidulée (sans cette précaution on n'observe rien), le plateau se chargerait d'électricité positive; c'est l'électricité positive de l'eau acidulée.

511. Pile. — Quoi qu'il en soit, Volta admettait comme conséquence de ces expériences, qu'au contact de deux métaux diffé-

rents, et en général au contact de deux substances différentes, il se développe une force électromotrice en vertu de laquelle les électricités contraires provenant de la décomposition du fluide neutre sont maintenues séparées. Il se produit par conséquent un état d'équilibre entre les attractions mutuelles des fluides et la force électromotrice.

Supposons, d'après cela, que sur une plaque isolante (fig. 436) on place un disque de cuivre et de zinc soudés, l'équilibre s'établit et les deux métaux constitutifs du couple sont électrisés contrairement. Qu'on place au-dessus du cuivre une rondelle de drap *d* imbibée d'eau acidulée et recouverte d'un second couple, celui-ci partagera par voie de conductibilité l'électricité positive du zinc; mais, en vertu de sa force électromotrice propre, il y aura une décomposition nouvelle de fluide neutre, si bien que l'intensité de l'électricité positive du second zinc sera supérieure à celle du premier. Par la même raison, le premier cuivre aura une intensité d'électricité négative supérieure à celle du second. On voit clairement que, par suite de cette indépendance d'action propre de chacun des couples, l'intensité de la charge électrique augmentera aux extrémités ou aux pôles de la pile à mesure que le nombre des couples sera plus considérable, si bien qu'en réunissant ces extrémités par un fil métallique, on aura un courant dont l'intensité sera en rapport avec le nombre des couples.

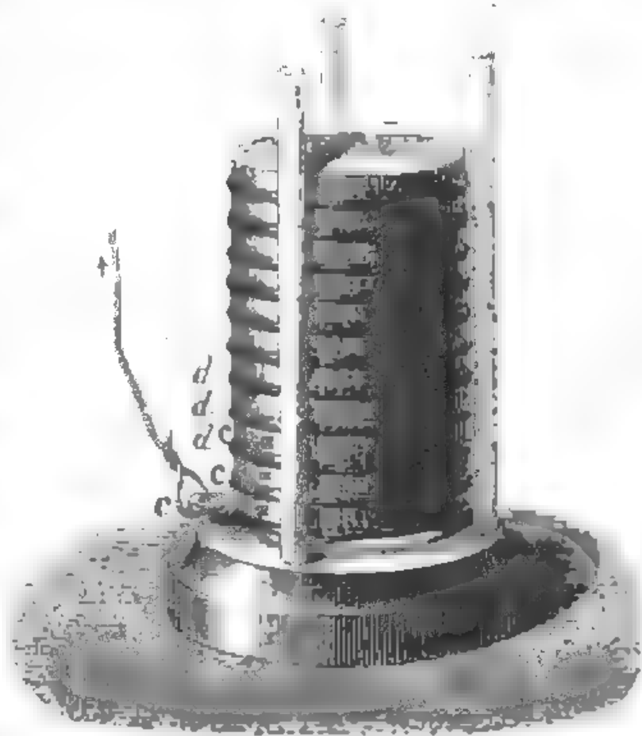


Fig. 436. — Pile de Volta.

Telle est l'origine de l'invention de la pile; c'est vers l'année 1800 que Volta publia cette découverte, que l'on a justement considérée comme la plus importante de la physique moderne, celle qui a eu l'influence la plus décisive sur ses progrès et qui a donné lieu aux applications les plus diverses et les plus intéressantes.

Devant l'éclat de cette découverte disparut, pour ainsi dire, l'intérêt avec lequel les savants suivaient la discussion engagée entre

Volta et Galvani. Ainsi passa inaperçu le fait considérable qu'il y a dans le corps des animaux du fluide électrique dans les conditions propres à produire dans certains cas un courant de sens déterminé.

Quant aux idées théoriques qui servirent de guide à Volta, elles ne sauraient supporter un examen sérieux, elles sont on peut dire en contradiction manifeste avec ce qu'il y a de plus fondamental dans la science. S'il y a, en effet, un principe absolu, c'est que les forces physiques ne se créent pas, qu'elles naissent les unes des autres en éprouvant diverses transformations, mais qu'il n'est pas plus en notre pouvoir de les créer ou de les détruire qu'il ne l'est de créer ou de détruire la matière. Comment comprendre dès lors que le courant, qui est susceptible de produire lui-même des phénomènes actifs de diverses sortes, puisse avoir pour origine le phénomène passif du contact? Cela est tout à fait contradictoire. Mais qu'on regarde fonctionner une pile : à mesure que se produit à l'extérieur de l'appareil le travail propre du courant, on voit à l'intérieur un travail correspondant, dont le premier est la transformation et la conséquence; c'est le travail chimique. Si donc nous utilisons pour diverses expériences la chaleur, la lumière, ou une action mécanique quelconque, dues au courant, c'est parce qu'un certain travail chimique s'est accompli, lequel s'est partiellement transformé; ce n'est donc que grâce à une certaine dépense que nous obtenons un effet déterminé conformément aux principes fondamentaux de la mécanique.

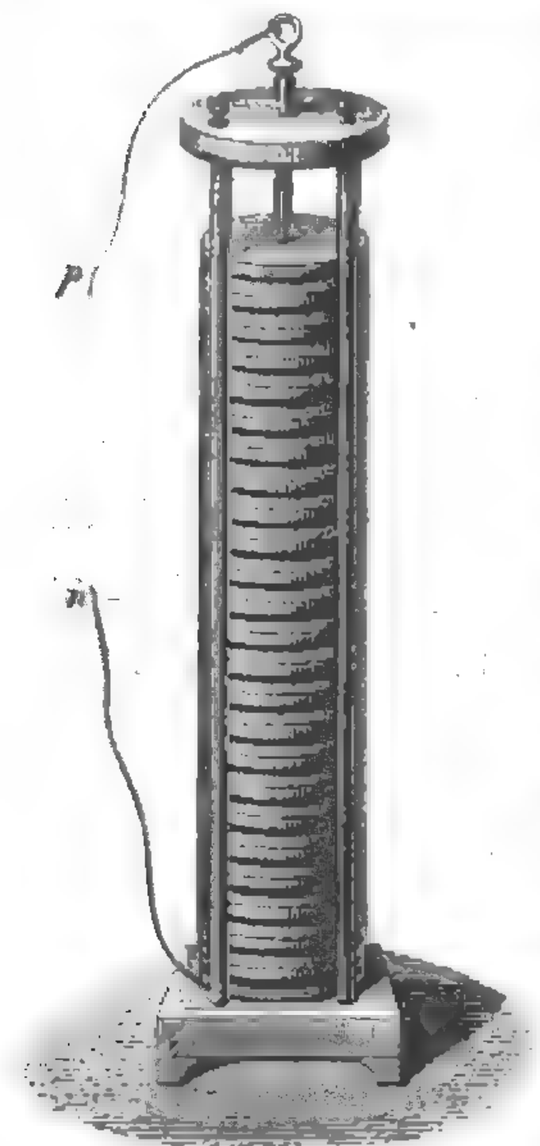


Fig. 437. — Pile à colonne.

512. Pile à colonne. — La pile de Volta a reçu depuis son invention diverses modifications de forme; nous indiquerons ici les dispositions les plus connues.

La pile à colonne (fig. 437) est la réalisation primitive de l'idée de l'inventeur. Elle se compose d'une série de doubles disques de cuivre et zinc soudés, disposés dans le

même sens et séparés les uns des autres par des rondelles de drap imbibées d'eau acidulée. Si, comme cela a lieu dans la figure, les zincs sont à la partie supérieure, c'est de ce côté que doit se trouver le pôle positif, puisque c'est vers cette extrémité que se meut l'électricité positive de l'eau acidulée; vers l'extrémité inférieure se meut l'électricité négative du zinc, c'est là qu'est le pôle négatif.

513. Pile à couronne de tasses. — La pile à colonne ne saurait se prêter utilement aux expériences qui doivent durer un peu de temps; en effet, à mesure que le nombre des éléments augmente, le poids des disques supérieurs fait écouler le liquide des rondelles inférieures, qui se dessèchent et perdent ainsi leur conductibilité. Volta avait imaginé lui-même la pile à couronne de tasses, dont nous donnons la figure.

Un certain nombre de vases placés à la suite les uns des autres et disposés circulairement renferment de l'eau acidulée. Les

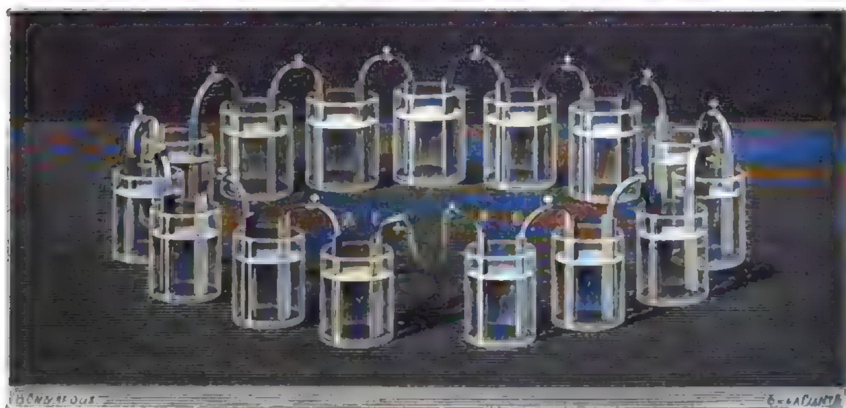


Fig. 438. — Pile à couronne de tasses.

vases communiquent successivement les uns aux autres par des arcs métalliques formés d'une lame de zinc soudée à une lame de cuivre. La communication a lieu pour chaque vase de la même manière, c'est-à-dire qu'à partir d'une des extrémités de la chaine, l'arc plonge par son cuivre dans l'élément qui précède, et par son zinc dans l'élément qui suit. Les deux vases qui forment l'extrémité de la série reçoivent l'un une lame de zinc, l'autre une

lame de cuivre, munies chacune d'un fil conducteur. Au premier correspond le pôle négatif, au second le pôle positif.

514. Pile à auges. — La disposition des lames métalliques étant assez incommode, on ne tarda pas à substituer à la pile à couronne

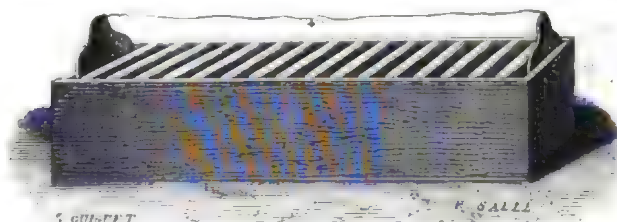


Fig. 439. — Pile à auges.

de tasses la *pile à auges,* dont l'usage devint assez général. C'est à l'aide de la pile à auges de l'institution royale, et qui avait 3000 couples, que Davy réussit, au commencement de ce siècle, à décomposer la potasse et la soude, et découvrit ainsi le potassium et le sodium.

La figure 439 représente la disposition de cette pile, dont l'invention est due à Cruiskshank. C'est une caisse rectangulaire divisée en compartiments ou auges, par des doubles lames de cuivre et de zinc soudées ; le zinc, figuré par une plus grande épaisseur dans le dessin, se trouve à gauche. On remplit les auges d'eau acidulée et on plonge deux lames de cuivre munies de rhéophores dans les auges extrêmes; à la première auge de gauche correspond le pôle positif et à l'extrémité opposée le pôle négatif.



Fig. 440. — Élément de Wollaston.

515. Pile de Wollaston. — La pile à auges est d'un maniement difficile à cause de son poids; d'ailleurs le bois de la caisse se déjette facilement sous l'action des acides. La disposition imaginée par Wollaston est beaucoup plus avantageuse.

Un élément de Wollaston (fig. 440) se compose d'une lame de zinc Z entourée d'une lame de cuivre C qui ne la touche pas, le contact étant empêché par de petits morceaux de bois ou de liége.

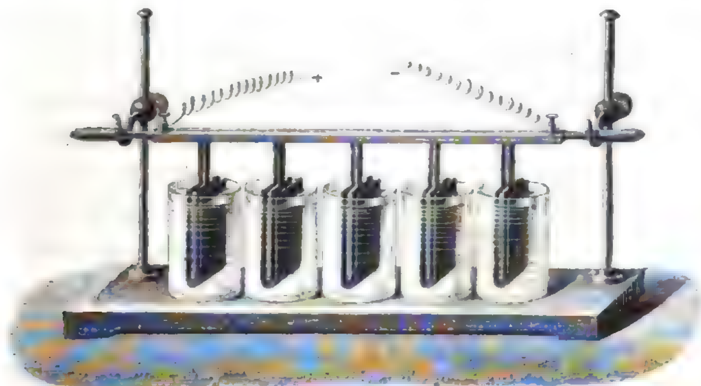


Fig. 441. — Pile de Wollaston.

Lorsqu'on veut mettre l'élément en activité, on le plonge dans un bocal contenant de l'eau acidulée; dès lors le pôle négatif s'établit sur le rhéophore en communication avec le zinc, et le pôle positif sur le rhéophore communiquant avec le cuivre.

Pour réunir plusieurs éléments en pile, on fait successivement communiquer le cuivre d'un élément avec le zinc de l'élément suivant. Les divers éléments ainsi constitués peuvent être fixés, comme le montre la figure 441, à une traverse, et quand on veut se servir de la pile, on les fait plonger séparément dans des vases contenant de l'eau acidulée.

516. Pile de Muncke. — La nécessité d'un vase pour chacun des éléments de la pile de Wollaston rend cette dernière un peu encombrante quand on veut avoir un grand nombre d'éléments; la pile de Muncke, à ce point de vue, est excessivement bien disposée, et l'on peut avoir sous un volume très-réduit un nombre d'éléments considérable.

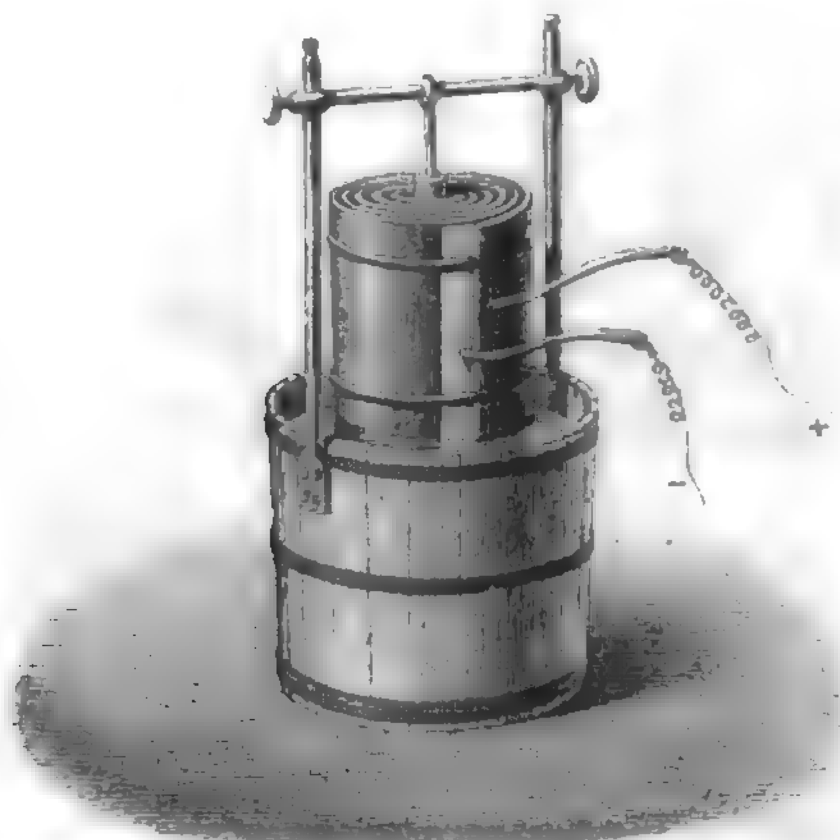


Fig. 442. — Pile de Muncke.

Les lames de zinc et de cuivre sont soudées (fig. 442) sur une

ligne verticale et disposées en forme d'U emboîtés alternativement les uns dans les autres, de façon que l'alternance des métaux soit complète. L'ensemble des éléments forme un système unique, que l'on peut fixer à un cadre en bois et que l'on plonge, quand on veut s'en servir, dans une auge en pierre renfermant de l'eau acidulée.

517. Pile à hélice. — Les piles d'un très-grand nombre d'éléments, comme la pile de Muncke, sont surtout applicables lorsque le courant doit rencontrer dans le circuit extrapolaire une grande résistance. Quand cette résistance est faible, il peut y avoir avantage à augmenter plutôt la surface des éléments que leur nombre. La pile à hélice de Hare réalise cette condition. Elle est formée (fig. 443) de deux plaques longues et larges de cuivre et de zinc qui, soudées par un de leurs bords, s'enroulent sans se toucher autour d'un cylindre de bois et communiquent chacune avec un fil métallique servant de rhéophore; le fil négatif est en communication avec le zinc, et le fil positif avec le cuivre. Lorsqu'on veut se servir de l'appareil, on le plonge dans une sorte de tonneau contenant de l'eau acidulée. En réunissant en pile six éléments à hélice, on obtient un appareil auquel l'intensité des effets calorifiques qu'il est capable de produire a fait donner le nom de *déflagrateur*.


Fig. 443. — Pile à hélice.

518. Inconvénients des piles ordinaires. — Les piles que nous venons de décrire présentent dans la pratique quelques inconvénients extrêmement graves. L'eau étant décomposée par le zinc, il se forme de l'hydrogène qui, se dégageant dans l'air chargé de particules acides, rend au bout de très-peu de temps l'atmosphère irrespirable. En outre, cet hydrogène forme sur la lame de cuivre une couche qui présente au courant une très-grande résistance et

en diminue notablement l'intensité. Enfin cette couche a une épaisseur variable, d'où résulte naturellement une variation perpétuelle dans l'intensité même du courant. Ces inconvénients disparaissent, en partie du moins, dans les piles à deux liquides.

519. Pile de Daniell. — L'élément de Daniell (fig. 444) se compose d'un vase extérieur contenant de l'eau acidulée, dans laquelle plonge un large cylindre de zinc Z. A l'intérieur de ce cylindre se trouve un vase en terre poreuse contenant une dissolution de sulfate de cuivre dans laquelle plonge un cylindre de cuivre C. Au fil conducteur fixé au zinc correspond, comme le montre la figure, le pôle négatif de l'élément. Si l'on réunit successivement le cuivre d'un élément avec le zinc d'un élément suivant, on formera une pile.



Fig. 444. — Élément de Daniell.

Il est aisé de voir que dans cette disposition la couche d'hydrogène qui joue un rôle si fâcheux dans les piles ordinaires n'existe plus. En effet, le sulfate de cuivre est décomposé, et le métal, suivant, ainsi que cela sera expliqué plus tard, le même chemin que l'électricité positive, vient se rendre sur la lame de cuivre; le dégagement d'hydrogène est donc, pour ainsi dire, remplacé par un dégagement de cuivre, ce qui ne change rien à la condition physique du système.

La pile de Daniell possède une régularité d'action des plus remarquables, et elle peut fonctionner pendant fort longtemps sans que l'atmosphère ambiante éprouve d'altération appréciable. Parmi les causes qui peuvent faire varier l'intensité du courant dans cette pile se trouve le changement de nature des liquides. En effet, l'eau

acidulée se charge de plus en plus de sulfate de zinc ; quant à la dissolution de sulfate de cuivre, son état de saturation diminue graduellement. L'expérience a montré que la première circonstance n'agit que d'une façon insignifiante sur l'intensité du courant. Il n'en est pas de même de la seconde et on a la précaution, pour en détruire l'effet, de placer, comme le montre la figure, des cristaux de sulfate de cuivre dans une sorte de rebord percé de trous du vase de cuivre de façon qu'ils soient en contact avec la dissolution. A mesure que celle-ci tend à s'affaiblir, elle reprend aux cristaux la portion du sel qui se trouve décomposée par l'action du courant et conserve le même titre.

520. Pile de Bunsen. — La pile dont on fait presque exclusivement usage aujourd'hui dans les cabinets de physique porte le nom de *pile de Bunsen;* elle date de l'année 1843. Moins régulière que la pile de Daniell, moins exempte que cette dernière du grave défaut d'altérer l'air ambiant, elle est surtout remarquable par son intensité et c'est à ce point de vue que son apparition excita le plus vif intérêt.



Fig. 445. — Élément de Bunsen.

On voit d'après la figure 445 sa disposition. Dans un vase extérieur contenant de l'eau acidulée, plonge une large lame de zinc, ainsi que cela a lieu dans l'élément de Daniell; mais dans le vase en terre poreuse on place de l'acide azotique à 40° et on y fait plonger un prisme en charbon conducteur; on peut employer par exemple celui qui porte le nom de *charbon de cornue,* et qui se dépose dans la partie supérieure des appareils où se produit le gaz

de l'éclairage. Pour former une pile (fig. 446), on réunit successivement à l'aide de pinces le charbon d'un élément avec le zinc de l'élément suivant; le pôle positif correspond évidemment au dernier charbon et le pôle négatif au dernier zinc.

Dans la pile de Bunsen l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau décompose à son tour l'acide azotique qui baigne le



Fig. 446. — Pile de Bunsen.

charbon; il en résulte de l'acide hypoazotique qui se dissout graduellement et qui ne se manifeste jamais sous la forme de bulles gazeuses. On a donc atteint le même résultat que dans la pile de Daniell; toutefois cet acide hypoazotique dissous se dégage ultérieurement dans l'atmosphère, qui se trouve ainsi viciée au bout d'un certain temps.

Il est juste de remarquer, au point de vue historique, que la pile de Bunsen n'est qu'une modification de celle de Grove, qui avait été construite plusieurs années avant. Dans cette pile, à la place du charbon se trouve une lame de platine. Le haut prix de ce métal le rendant à peu près inapplicable, quelques constructeurs avaient songé à le remplacer par du charbon, et il existait quelques éléments de ce genre dans le commerce lors de la publication de M. Bunsen.

L'élément primitif de Bunsen n'était pas d'ailleurs semblable à celui dont nous donnons la figure. Le zinc et l'eau acidulée étaient à l'intérieur dans le vase poreux; le vase extérieur renfermait l'acide azotique dans lequel plongeait un cylindre de charbon conducteur, préparé et moulé spécialement pour cet objet. Cette

disposition était peu rationnelle; outre l'inconvénient de placer le liquide le plus cher, l'acide azotique, dans le vase le plus grand, il se rencontrait dans la préparation du charbon de très-sérieuses difficultés. Le système actuel, qui revient à la disposition de Grove et qui permet d'employer une baguette ou un prisme de charbon, est infiniment plus commode.

521. Propriétés du zinc amalgamé. — Dans une pile en activité le travail produit à l'extérieur correspond à l'oxydation ou à la combustion du zinc, de même que dans une machine thermique le travail provient de la combustion du charbon. Dans les piles montées à l'eau acidulée, si l'on emploie du zinc ordinaire, celui-ci se trouve toujours attaqué, que la pile soit ou ne soit pas en activité, il y a donc dans ce dernier cas consommation du zinc sans effet utile. Ce résultat n'aurait pas lieu si l'on faisait usage de zinc chimiquement pur. Il n'a pas lieu non plus lorsque l'on emploie le zinc amalgamé, et c'est ce qu'il convient de faire toujours. Pour amalgamer les cylindres de zinc, on les décape d'abord avec de l'eau acidulée, puis on les frotte avec du mercure. On peut aussi les plonger dans une dissolution d'un sel de mercure; celui-ci est précipité par l'action du zinc, et il suffit ensuite d'une friction pour que l'amalgamation soit complète.

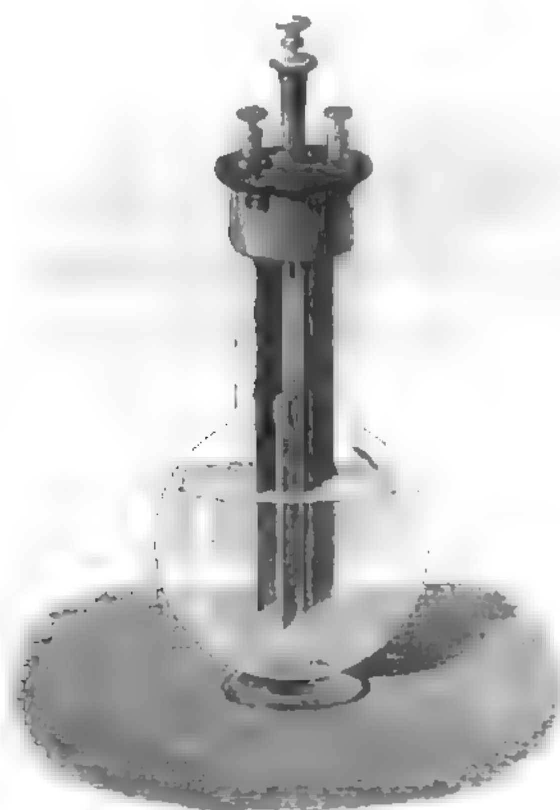


Fig. 441. — Pile au bichromate.

522. Pile au bichromate de potasse. — On a imaginé un grand nombre de modèles de piles dont la description serait sans intérêt; nous mentionnerons ici seulement la pile au bichromate de potasse, dont on se sert fréquemment dans les cours pour animer divers appareils électriques. L'élément est formé (fig. 447) d'un ballon contenant une dissolution au $\frac{1}{20}$ de bichromate de potasse additionnée d'acide sulfurique en quantité égale à celle du bichromate. Dans le liquide plonge une double lame de ~~zinc~~ charbon dans l'intérieur de laquelle est disposée une lame de ~~charbon~~ zinc; à ce dernier cor-

respond le pôle ~~positif~~. Lorsque l'on veut suspendre l'action de la pile, on soulève la lame de zinc afin de supprimer son contact avec le liquide.

523. Courants thermo-électriques. — Le travail produit dans l'action chimique n'est pas le seul moyen d'obtenir un courant; on peut arriver au même résultat par l'action de la chaleur, ainsi que l'a démontré pour la première fois le docteur Seebeck, de Berlin, en 1821. Pour faire l'expérience, on se sert d'une lame de cuivre recourbée et soudée à ses deux extrémités à un cylindre de bismuth (fig. 448); on a ainsi une sorte de rectangle dont la lame de cuivre fait trois côtés et le cylindre de bismuth le quatrième. On dispose l'appareil de façon que les longs côtés du rectangle soient à peu près dans le méridien magnétique, et on place dans son intérieur une aiguille aimantée. Si on vient alors, avec une lampe à alcool, à chauffer l'une des soudures du circuit, l'aiguille aimantée est déviée, ce qui accuse la production d'un courant électrique qui, comme le montre la figure, est dirigé dans la lame de cuivre de la soudure chaude à la soudure froide. Si, au lieu de chauffer la soudure, on l'eût refroidie avec de la glace, il se serait produit aussi un courant, mais de sens inverse.

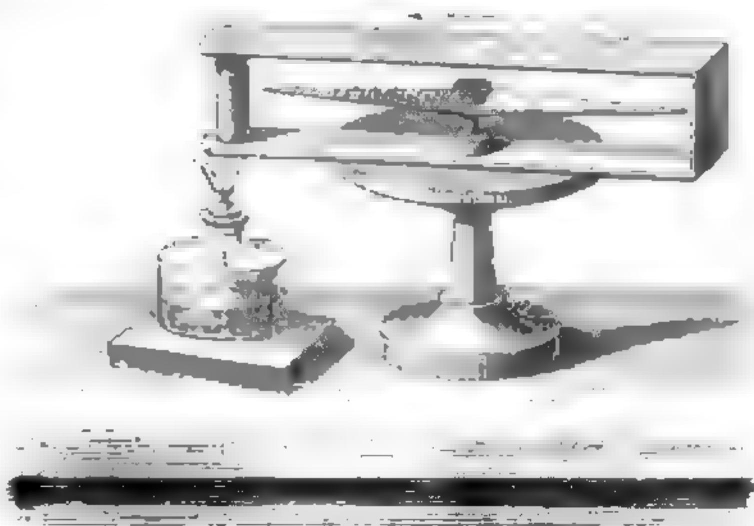


Fig. 448. — Courants thermo-électriques.

524. Bien que cette expérience soit surtout sensible avec le bismuth et l'antimoine, elle réussit néanmoins avec des métaux quelconques. Il n'est même pas nécessaire de chauffer un point du circuit où se trouve le contact de deux métaux différents, dès que de part et d'autre du point où se produit l'élévation de température il n'existe pas une égalité parfaite de structure, un courant se manifeste. Ce fait important se démontre par des expériences diverses. Que l'on prenne, par exemple, un fil de platine sur lequel on aura fait un nœud, et qu'on chauffe dans son voisinage, il se produit un courant que l'on rend sensible en mettant les extré-

mités du fil en rapport avec un galvanomètre, instrument qui sera décrit dans le chapitre suivant. Le courant change d'ailleurs de sens suivant que l'on chauffe d'un côté ou de l'autre du nœud. La même chose a lieu si l'on contourne en hélice une portion du fil (fig. 449). Dans les métaux qui, comme le bismuth, présentent peu d'homogénéité, il n'est pas rare d'observer des courants thermo-électriques, lorsqu'on vient à chauffer des circuits qui ne présentent d'ailleurs extérieurement aucune particularité caractéristique.



Fig. 449.

Remarquons que c'est à une différence, quelque légère qu'elle soit d'ailleurs, de structure et non point à toute autre circonstance, comme, par exemple, à un changement de dimensions, qu'il faut attribuer la production du phénomène. Quand la constitution moléculaire est la même des deux côtés du point chauffé, il ne se manifeste jamais de courant. Les deux expériences suivantes dues à M. Magnus sont à cet égard décisives.

Il fit amincir dans sa partie moyenne un cylindre de cuivre de façon à le réduire à un fil très-mince ; en échauffant le métal à l'endroit du changement brusque de diamètre, il n'observa aucun courant, bien qu'il dût y avoir une différence dans la propagation de l'électricité de part et d'autre de ce point.

La seconde expérience consiste à prendre deux tubes AB et DC



Fig. 450.

pleins de mercure (fig. 450) ; les extrémités A et D sont en rapport avec les deux fils du galvanomètre. On chauffe le mercure contenu dans la partie C, et l'on y plonge l'extrémité du tube B ; on ne constate jamais dans ce cas la production d'aucun courant. Du reste, si une différence de structure est nécessaire pour la manifestation du

courant, cette différence peut être fort insignifiante. Ainsi, que l'on recourbe en crochet les extrémités de deux fils de platine et qu'après avoir chauffé l'un d'eux on le pose sur l'autre, il ne se produira rien, parce que l'action de la chaleur sur le platine ne lui a fait subir aucune modification. Mais si on répète l'expérience avec des fils de cuivre, un courant aura lieu, l'action de la chaleur ayant produit une légère couche d'oxyde qui a modifié la constitution du métal.

525. Sens du courant thermo-électrique. — Il résulte évidemment de ce qui précède que l'action de la chaleur a pour effet de provoquer dans les corps, et particulièrement dans les métaux, le mouvement des fluides qui caractérise le courant. Si dans un conducteur homogène on n'observe rien, c'est que les deux courants produits de chaque côté du point chauffé sont égaux et de sens contraire ; mais une différence de structure modifie l'intensité de l'un des courants, et le galvanomètre accuse la résultante des deux effets produits.

Quand il s'agit d'une soudure de deux métaux différents, le sens du courant dépend de la nature des métaux associés et il est impossible de formuler à cet égard aucune loi précise. Dans la liste suivante qui résulte d'expériences faites par M. Becquerel, les métaux sont placés dans un ordre tel, que le courant traverse la soudure chaude en allant de celui qui précède à celui qui suit :

Bismuth, platine, plomb, étain, cuivre, argent, zinc, fer, antimoine.

526. Pouvoirs thermo-électriques. — L'intensité des courants thermo-électriques dépend de la nature des métaux qui se touchent à la soudure ; il y a pour chaque association une sorte de force électromotrice propre, à laquelle on donne le nom de *pouvoir thermo-électrique*.

Pour comparer ces pouvoirs thermo-électriques, M. Becquerel s'est servi d'une chaîne (fig. 451) formée de plusieurs métaux soudés successivement les uns au bout des autres. Les extrémités de la chaîne étant mises en communication avec un galvanomètre, on chauffe l'une des soudures à une température déterminée, 40° par exemple, et l'on maintient toutes les autres soudures à zéro. Le cou-

rant produit ayant dans tous les cas à traverser un circuit d'égale résistance, son intensité pourra être considérée comme la mesure proportionnelle du pouvoir thermo-électrique de la soudure, au moins à la température à laquelle on opère. C'est ainsi que M. Becquerel a obtenu le tableau suivant :

Fer — platine.	36,07	Cuivre — platine. . . .	8,55
Fer — étain.	31,24	Cuivre — étain.	3,50
Fer — cuivre.	27,96	Cuivre — argent. . . .	2,00
Fer — argent.	26,20	Zinc — cuivre. . . .	1,00

Dans ces expériences M. Becquerel a constaté le fait suivant, dont l'importance est réelle. Supposons que l'on chauffe une soudure fer et cuivre, on aura un courant d'une certaine intensité ; si entre le fer et le cuivre se trouve un métal intermédiaire, ou même une chaîne de plusieurs métaux, et que l'on chauffe les deux soudures extrêmes, on aura exactement le même résultat. C'est là une preuve que le courant est bien réellement dû à la différence de propagation de la chaleur dans les métaux et non point, par exemple, au contact.



Fig. 451.

527. Influence de la température. — L'intensité du courant produit par un couple thermo-électrique dépend de la différence de température des deux soudures, et, dans une certaine limite variable d'ailleurs suivant les métaux, lui est sensiblement proportionnelle; mais à partir d'un certain moment, l'accroissement d'intensité du courant se ralentit très-notablement. Ainsi il est à peine sensible vers 300° pour un couple fer et cuivre ; au delà l'intensité du courant diminue, devient nulle et finit par changer de sens. Il faut remarquer d'ailleurs que la différence de température n'influe pas seule sur le phénomène, il faut tenir compte aussi de la température absolue. Ainsi le courant n'a pas la même intensité, l'une des soudures étant à zéro et l'autre à 20°, que si les températures étaient à 100 et 120°.

528. Piles thermo-électriques. — En associant ensemble un

certain nombre de couples thermo-électriques et chauffant simultanément les soudures pareilles, on obtient une pile thermo-électrique. La figure 452 représente un appareil de ce genre, dû à

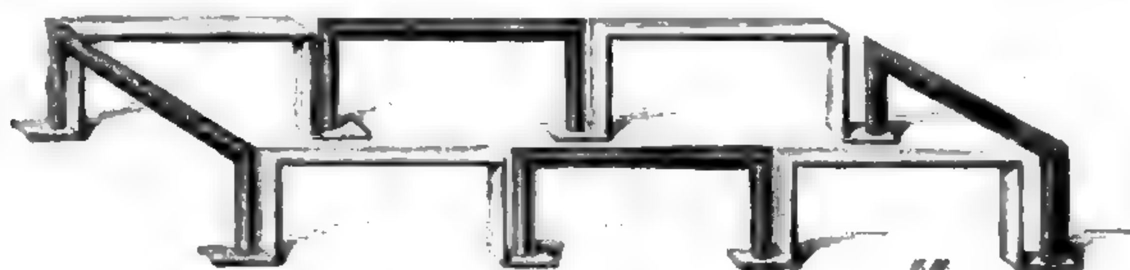


Fig. 452. — Pile thermo-électrique de Pouillet.

M. Pouillet. Il se compose de cylindres en bismuth recourbés à leurs extrémités et communiquant les uns avec les autres par des lames de cuivre également recourbées et venant se souder au bismuth. Si l'on plonge les soudures d'ordre impair, par exemple, dans la glace fondante, tandis que les soudures d'ordre pair sont chauffées à une température déterminée, il se produit un courant que l'on peut recueillir dans un fil extrapolaire comme dans la pile ordinaire.

Au point de vue de la production courante de l'électricité, les piles thermo-électriques n'ont pas jusqu'à présent donné de résultats bien utiles. C'est qu'en effet, par suite de la conductibilité des milieux dans lesquels ils prennent naissance, les courants thermo-électriques s'affaiblissent très-rapidement dans les circuits un peu résistants. Ainsi 120 couples fer et platine sont au moins nécessaires pour produire une décomposition appréciable de l'eau. M. Edmond Becquerel a fait connaître récemment un couple thermo-électrique d'une puissance exceptionnelle : il est formé par l'association du maillechort N et du sulfure de cuivre artificiel M (fig. 453). Le pôle positif est au sulfure de cuivre. La figure 454 représente une pile de ce nouveau système. On élève la température des soudures à l'aide du gaz d'éclairage ; on peut ainsi, avec 30 ou 40 éléments, décomposer sensiblement l'eau, entretenir un électro-aimant à fil long, faire fonctionner un télégraphe. La commodité

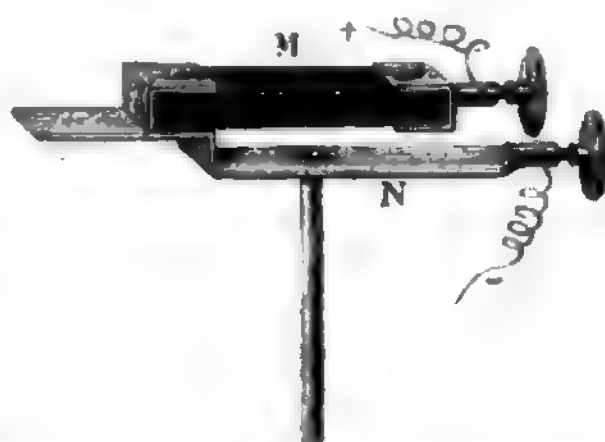


Fig. 453. — Élément thermo-électrique de M. Edmond Becquerel.

d'emploi du gaz d'éclairage, l'économie de sa production, peuvent faire prévoir une utilisation sérieuse des courants thermo-électriques.

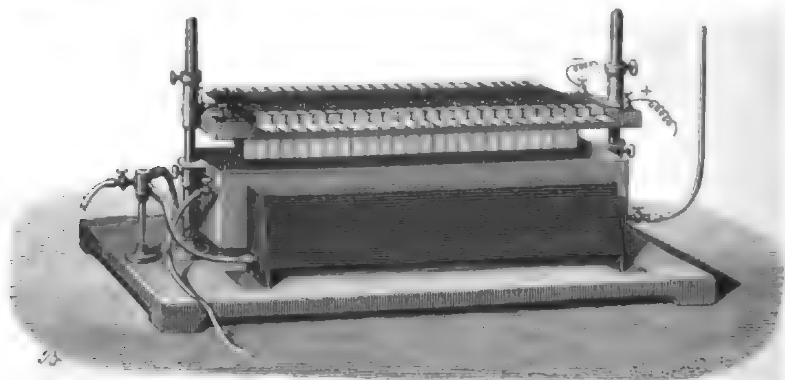


Fig. 454. — Pile de M. Edmond Becquerel.

529. Application des courants thermo-électriques à la mesure des températures. — Jusqu'à présent on ne s'est servi des courants thermo-électriques que pour la mesure des températures dans des conditions spéciales. Nous avons déjà décrit la pile de Nobili dans le chapitre de la *chaleur rayonnante*. La pince thermo-électrique de Peltier, que représente la figure 455, est très-propre à explorer la température d'un espace limité. Ce sont deux couples thermo-électriques de bismuth et d'antimoine, *a b* et *a' b'*. Le bismuth d'un élément et l'antimoine de l'autre sont réunis par un fil, le circuit est complété par un galvanomètre; de cette disposition il résulte que, l'espace compris entre les deux soudures C et C' venant à s'échauffer, un courant du bismuth à l'antimoine se produira dans les deux couples. Ces deux courants agiront d'ailleurs dans le même sens sur l'aiguille aimantée, et comme la masse et la capacité calorifique de l'instrument est très-faible, sa sensibilité est très-grande.

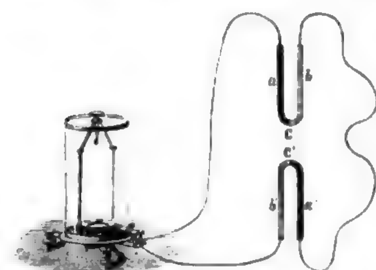


Fig. 455. — Pince thermo-électrique.

C'est à des espèces de sondes thermo-électriques très-fines, qui

peuvent dans certains cas pénétrer sans lésion dans les organes, qu'on a eu recours pour étudier la température des êtres organisés ainsi que les variations qu'elle peut éprouver dans des circonstances particulières. Nous citerons encore l'appareil dont se sert M. Becquerel pour la mesure de la température de l'air. Il se compose de deux pinces dont l'une est dans l'atmosphère et l'autre dans le laboratoire. Un galvanomètre placé dans le circuit marque zéro lorsque les deux pinces sont à la même température ; il suffit donc, lorsque l'aiguille est déviée, de chauffer ou de refroidir la seconde pince de façon à la ramener au zéro pour connaître la température de l'air.

CHAPITRE XLVI.

GALVANOMÈTRE.

530. Expérience d'Œrstedt. — Nous avons, dans le chapitre précédent, défini physiquement le courant par son action sur l'aiguille aimantée, mais en fait ce n'est que vingt ans environ après la découverte de la pile, en 1819, que cette relation entre le courant et l'aimant fut observée par le physicien danois Œrstedt. Cette découverte produisit une très-grande sensation dans le monde savant, car elle établissait entre le magnétisme et l'électricité un lien précis, qui devait d'ailleurs servir de point de départ aux plus importantes découvertes.

On peut facilement répéter l'expérience d'Œrstedt, comme l'indique la figure 456. Deux fils conducteurs sont placés dans le méridien magnétique, l'un au-dessus, l'autre au-dessous d'une aiguille aimantée. Si l'on vient à faire passer un courant dans l'un des fils, on voit immédiatement l'aiguille aimantée dévier, de manière à se mettre presque en croix avec le courant, et d'autant plus près de cette position perpendiculaire que le courant est plus intense. La déviation varie d'ailleurs suivant le sens du courant et aussi suivant la position relative du conducteur et de l'aiguille.

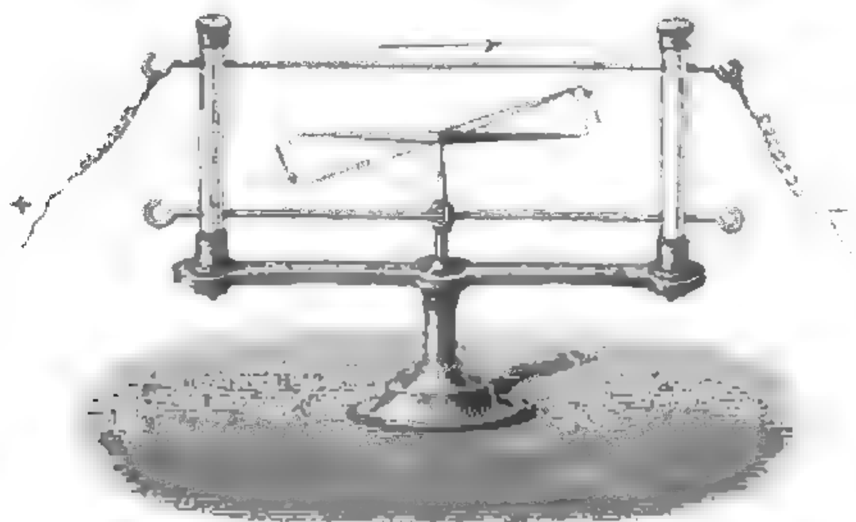
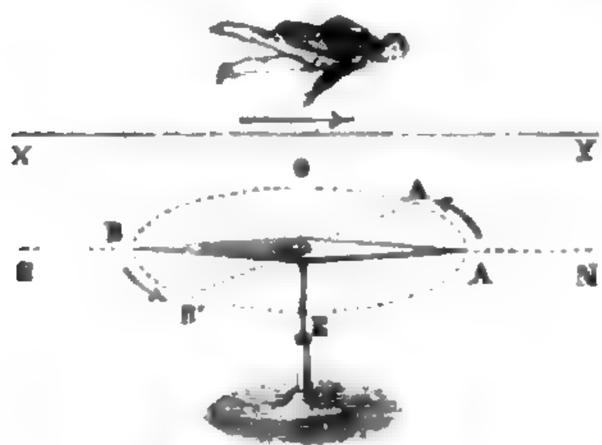


Fig. 456. — Expérience d'Œrstedt.

Ainsi, dans le cas de la figure, si le courant passe dans le fil supérieur du sud au nord, le pôle austral figuré en noir est dévié vers l'ouest; si le courant passait dans le fil inférieur, la déviation aurait lieu vers l'est. En changeant le sens du courant, on obtient, dans le cas du courant supérieur, une déviation vers l'est, et une déviation inverse quand le courant est inférieur.

Si l'on dispose le courant verticalement en face du pôle austral de l'aiguille, il y a déviation de ce pôle vers l'est quand le courant est ascendant, et vers l'ouest quand il est descendant. L'inverse a lieu quand le courant est placé en regard du pôle boréal.

531. Loi d'Ampère. — Il paraît assez difficile, au premier abord, de saisir la loi générale et précise de ces diverses déviations. Ampère y est parvenu en définissant la droite et la gauche du courant. On appelle droite et gauche du courant la droite et la gauche d'un observateur qui, couché dans le courant de manière que celui-ci



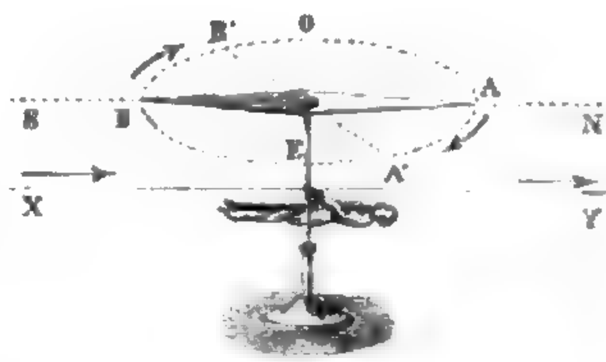


Fig. 457. Loi d'Ampère. Fig. 458.

le traverse des pieds à la tête, regarde l'aiguille aimantée. D'après cette définition, la loi d'Ampère consiste en ce que, dans tous les cas, *le pôle austral de l'aiguille aimantée se place à la gauche du courant.*

Les deux figures 457 et 458, correspondantes aux deux premiers cas indiqués dans le paragraphe précédent, montrent l'exactitude de cette loi. On reconnaît en effet que la déviation du pôle austral A doit se faire vers l'ouest dans le cas de la première, et vers l'est dans le cas de la seconde.

532. Principe des appareils rhéométriques. — Dans l'expérience d'Œrstedt, la déviation de l'aiguille est d'autant plus prononcée que l'intensité du courant est plus considérable; il y a en effet l'action du courant qui tend à mettre l'aiguille en croix avec

lui-même, et le magnétisme terrestre, qui tend à la ramener dans le méridien magnétique; c'est sous l'action de ces deux forces contraires que l'aiguille prend une position intermédiaire, faisant avec le méridien un angle d'autant plus grand que l'intensité du courant est plus considérable. C'est sur ce principe que sont fondés les appareils destinés à la mesure des courants, appareils qui portent le nom général de *rhéomètres*.

533. Boussole des sinus. — Lorsque le courant a une certaine intensité, on peut employer l'appareil imaginé par M. Pouillet et connu sous le nom de *boussole des sinus*. Il se compose d'un cercle vertical, sur lequel s'enroule, en faisant un ou plusieurs tours, le fil traversé par le courant que l'on veut mesurer. Ce cercle est mobile autour d'un axe vertical, de manière à pouvoir être placé dans un azimut quelconque; une alidade mobile sur un cercle horizontal divisé permet de mesurer la rotation produite. Au centre du cercle se trouve placée une aiguille de déclinaison, mobile sur un cadran divisé.

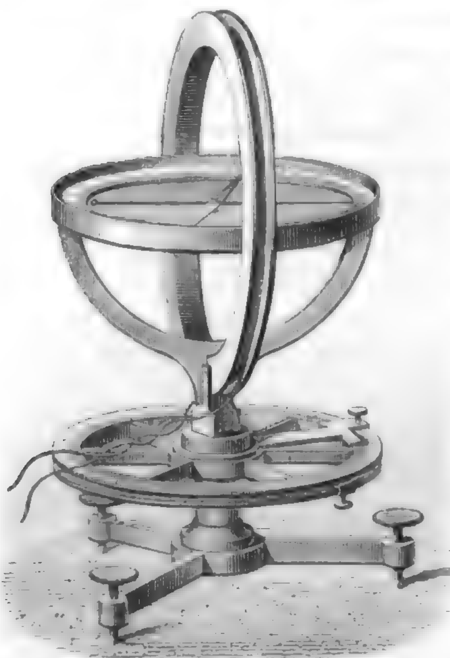


Fig. 459. — Boussole des sinus.

Supposons que, l'aiguille et le cercle vertical étant dans le méridien magnétique, on vienne à faire passer le courant, l'aiguille est déviée, son extrémité s'éloigne du zéro, et elle sort du plan vertical du cercle; on fait alors mouvoir celui-ci, de manière à le ramener au-dessus de l'aiguille, et de façon que celle-ci se trouve de nouveau au zéro; il faut pour cela produire une rotation mesurée sur le cercle horizontal et qui représente évidemment l'angle α qui sépare actuellement la position de l'aiguille du méridien magné-

tique. Dans cette situation, l'aiguille tend à revenir à sa position d'équilibre avec une force proportionnelle au sinus de l'angle α (496). Or, d'après la symétrie de position du courant et de l'aiguille, il est clair que l'action du courant est perpendiculaire à son plan et par suite directement opposée à la composante efficace de l'action terrestre. Les intensités des courants qui passent successivement dans l'appareil sont donc proportionnelles aux sinus des angles des déviations : de là le nom donné à l'appareil.

La première idée de cet ingénieux instrument paraît due à M. Péclet.

534. Boussole des tangentes. — La boussole des tangentes, d'une construction plus simple, se compose d'une aiguille aimantée *très-petite*, mobile sur un cercle divisé et placée au centre d'un cercle fixe traversé par le courant. A raison des dimensions très-considérables de ce cercle, le pôle a' de l'aiguille (fig. 460) peut être considéré comme n'ayant pas changé de position dans l'espace ; l'action du courant perpendiculaire au plan qui contient la position initiale de l'aiguille donne une composante efficace suivant $a't'$ proportionnelle au cosinus de l'angle de déviation et qu'on peut représenter par F cos α ; c'est elle qui fait équilibre à la composante de l'action directrice du globe, laquelle dirigée suivant $a't$ est égale à T sin α ; on a donc

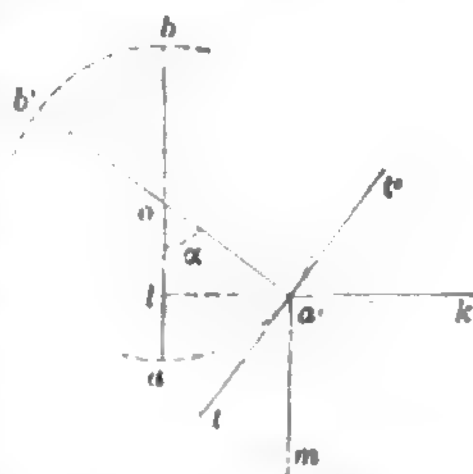


Fig. 460. — Principe de la boussole des tangentes.

$$F \cos \alpha = T \sin \alpha, \qquad \text{d'où} \quad F = T \operatorname{tang} \alpha.$$

On voit donc que les intensités des courants sont mesurées proportionnellement dans cet appareil par les tangentes des angles de déviation directe.

Pour pouvoir lire les déviations de la petite aiguille, on fixe perpendiculairement sur elle une longue tige de cuivre dont l'extrémité parcourt les divisions du cercle gradué.

535. Galvanomètre. — Lorsqu'il s'agit de constater la présence

et de mesurer l'intensité de courants extrêmement faibles, on a recours à des appareils appelés *galvanomètres*, et qui sont dans l'électricité dynamique à peu près ce qu'est l'électroscope condensateur dans l'électricité statique.

Le premier appareil de ce genre a été construit par Schweiger, en 1827. Il se compose d'un cadre en bois (fig. 461), autour duquel s'enroule, en faisant un grand nombre de tours, un fil métallique dont on met les extrémités en rapport avec le courant que l'on veut observer. On voit, d'après la figure 462, que, le courant marchant dans le sens MNQP, toutes les parties du cadre agissent d'après la loi d'Ampère pour pousser le pôle austral a du même côté, c'est-à-dire en avant de la figure. Si d'ailleurs le fil fait un certain nombre de tours et que les diverses spires soient soigneusement isolées à l'aide de la soie ou de toute autre substance non conductrice, chacun des tours agira individuellement et séparément sur l'aiguille aimantée, qui se trouvera soumise ainsi à une action notablement plus forte. C'est à raison de cette circonstance que l'inventeur de l'instrument lui avait donné le nom de *multiplicateur*.

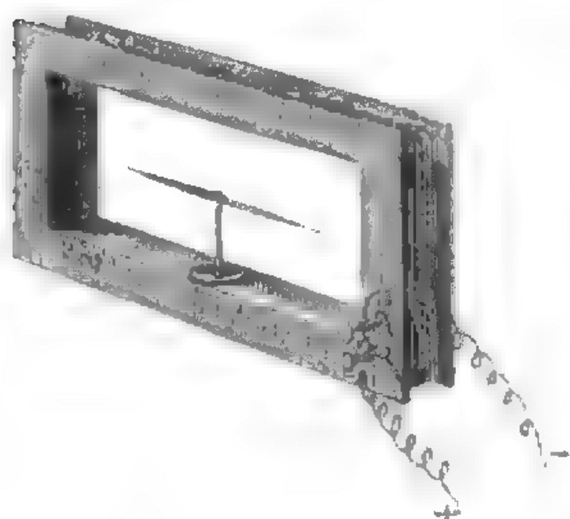


Fig. 461. — Multiplicateur de Schweiger.

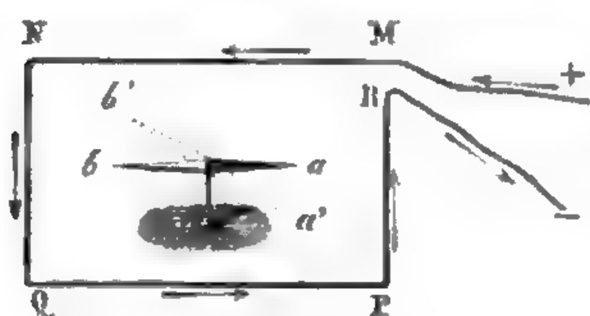


Fig. 462.

Il convient de remarquer toutefois que cette expression n'est pas rigoureusement exacte. En effet, l'intensité d'un courant dépend, comme nous l'expliquerons dans le chapitre suivant, et de la nature de la source et de la résistance du circuit qu'il doit traverser. Quand, pour constater la présence du courant dans une condition déterminée, on ajoute au milieu dans lequel il se produit le fil du galvanomètre, cette addition a pour premier résultat de diminuer son intensité. D'autre part, il est vrai, son action sur l'aiguille est multipliée par le nombre de tours, mais il pourrait arriver telle et telle circonstance où l'avantage du second effet ne suffirait pas à compenser l'inconvénient du premier. Ainsi en lançant un

courant thermo-électrique dans un galvanomètre à fil *long et fin*, on peut ne pas avoir de déviation appréciable. Aussi pour ce genre de courants on emploie des galvanomètres à fil *gros et court*. En réalité, ce qui est multiplié dans l'appareil de Schweiger, ce n'est pas l'intensité du courant telle qu'elle existe dans l'endroit où il se produit initialement, c'est son intensité telle qu'elle est modifiée par l'addition du circuit du galvanomètre. C'est-à-dire que, si le fil ne s'enroulait pas et agissait simplement sur l'aiguille, il se produirait une action qui se trouve multipliée par le nombre des tours.

536. Galvanomètre à deux aiguilles. — On peut accroître considérablement la sensibilité déjà très-grande du galvanomètre à l'aide d'une disposition fort ingénieuse due à Nobili. Elle consiste à employer, au lieu d'une seule aiguille, un système de deux aiguilles fixées à une même pièce en métal et dont les pôles de nom contraire se regardent. Un pareil système se nomme *astatique*, et il est clair que, si les deux aiguilles sont également aimantées, il sera tout à fait indifférent à l'action du globe; car, tandis que le pôle austral de l'une tend à se tourner vers le nord, l'autre tend à prendre une direction contraire.

L'une des aiguilles, *ab* (fig. 463), est placée dans l'intérieur du cadre du galvanomètre, l'autre *a'b'* est placée au-dessus et à une petite distance. Supposons qu'un courant traverse le fil dans le sens des flèches, l'action de toutes les parties du courant sur l'aiguille intérieure est de pousser le pôle austral *a* à la gauche, c'est-à-dire en arrière de la figure. L'action de CD sur l'aiguille supérieure est de même sens, car elle pousse le pôle austral *a'* en avant de la figure, et par suite le pôle boréal *b'* en arrière. Il est vrai que les autres parties du courant produisent sur l'aiguille supérieure une action inverse; mais, à raison de la proximité de la partie CD, l'effet de cette dernière est évidemment prédominant. Il suit de là que, tandis que l'action de la terre se trouve annulée par l'addition de l'aiguille supérieure, l'effet du courant sur l'aiguille intérieure non-seulement n'est pas diminué, mais éprouve même une légère aug-

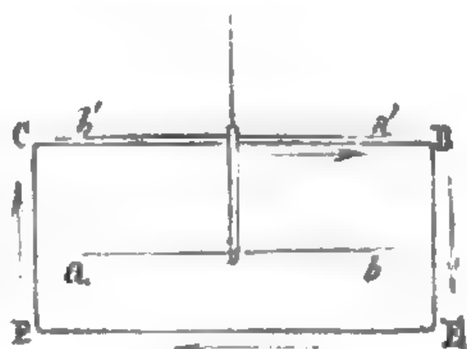


Fig. 463.

mentation. Cet effet n'étant plus contrarié par l'action directrice du globe, il s'ensuit que l'instrument est très-notablement plus sensible que celui qui n'a qu'une aiguille.

Si les deux aiguilles formaient un système rigoureusement astatique, la force directrice étant tout à fait nulle, les aiguilles se mettraient toujours en croix avec le courant. Au fond ce serait là un inconvénient, car il n'y aurait plus de différence entre les effets des courants, quelle que fût leur intensité relative. En réalité, l'aiguille supérieure a un degré de magnétisme un peu plus fort; il y a donc une légère force directrice qui permet de distinguer les courants d'inégale force, et même, par une graduation convenable, de mesurer leur intensité.

La figure 464 représente un galvanomètre à deux aiguilles, tel qu'on le construit le plus ordinairement. Le fil conducteur s'enroule autour d'un cadre en ivoire supportant le cadran divisé sur lequel se meut l'aiguille supérieure. Les extrémités du fil sont en communication électrique avec deux bornes métalliques que l'on met en rapport avec le fil qui est traversé par le courant à étudier. Les aiguilles aimantées sont ordinairement deux aiguilles à coudre, la supérieure portant une petite pièce très-légère qui augmente sa longueur et permet de lire plus exactement les déviations. Le système est suspendu par un fil de cocon très-fin fixé supérieurement à un crochet mobile. Lorsque l'instrument ne sert pas, on abaisse les aiguilles de manière que la supérieure repose directement sur le

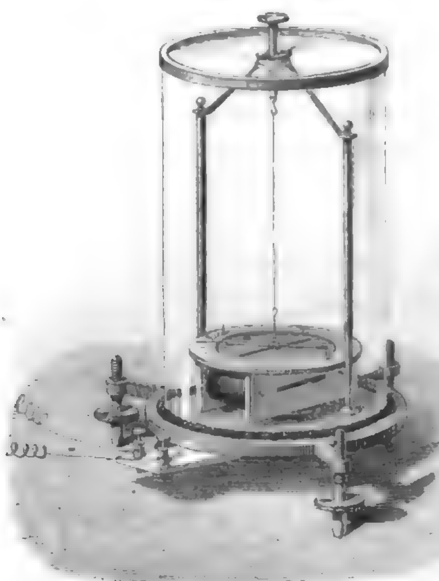


Fig. 464. — Galvanomètre à deux aiguilles.

cadran ; de cette façon on ne fatigue pas inutilement le fil. Lorsqu'on veut se servir de l'appareil, on commence par soulever les aiguilles et, à l'aide de vis calantes, on s'arrange de façon que la pièce qui les porte coïncide bien avec le milieu de l'ouverture pratiquée pour leur donner passage au centre du cadran divisé. De cette manière le mouvement des aiguilles peut se faire sans être gêné par les bords de l'ouverture ou de la partie intérieure du cadre, et le système se place dans la direction du méridien magnétique. L'aiguille supérieure correspond alors en général à une division quelconque du cadran. A l'aide d'un bouton qu'on ne voit pas sur la figure on imprime au cadre un mouvement de rotation qui permet d'amener le zéro au-dessous de l'extrémité de l'aiguille.

537. Graduation du galvanomètre. — Les déviations de l'aiguille du galvanomètre ne sont pas en général proportionnelles aux intensités des courants qui les produisent ; il faut donc, pour pouvoir appliquer cet instrument à des recherches précises, construire une table qui donne pour chaque déviation l'intensité du courant correspondante. Plusieurs méthodes peuvent être employées dans ce but ; nous indiquerons ici celle qu'employait Melloni. Il plaçait deux sources de chaleur de part et d'autre de la pile et les faisait rayonner d'abord successivement et ensuite simultanément en observant la déviation. Supposons que l'une des sources donne une déviation de 10° et l'autre une déviation de 5° ; en les faisant agir ensemble on trouve une déviation de 5° dans le sens de la première. Si on représente par F et f les intensités des courants correspondants, on a évidemment la relation

$$F - f = f, \quad \text{d'où} \quad F = 2f.$$

Cela veut dire que l'intensité du courant correspondante à la déviation de 10° est double de celle qui correspond à 5°. Un résultat analogue a été observé par Melloni dans son galvanomètre toutes les fois que les déviations ne dépassent pas 20°. On peut donc jusqu'à cette limite admettre que les déviations sont proportionnelles aux intensités. Ce résultat connu, on peut facilement prolonger la table de la manière suivante : On fait rayonner successivement les deux

sources de façon qu'elles produisent, l'une une déviation de 20°, l'autre une déviation de 25°; en les faisant agir simultanément on trouve une déviation, dans le sens correspondant à la source la plus intense, égale à 6°,5. Les nombres 20° et 6°,5 étant la mesure des courants correspondants, on aura, en désignant par x l'intensité correspondante à 25°,

$$x - 20 = 6,5, \quad \text{d'où} \quad x = 26,5.$$

En continuant ainsi de proche en proche, on pourra étendre la table jusqu'à 90°.

Cette méthode n'est applicable qu'aux galvanomètres appropriés aux courants thermo-électriques ; nous verrons dans le chapitre suivant un moyen applicable aux galvanomètres à fil long. Mais il est important de remarquer que la table n'a de sens que quand on se sert de l'instrument pour lequel elle a été faite ; il n'y a pas ici de loi générale comme dans le cas de la boussole des sinus ou des tangentes, la détermination des intensités a un caractère tout à fait empirique et propre à l'instrument sur lequel on opère.

CHAPITRE XLVII.

LOI DE OHM.

538. L'intensité du courant qui passe dans un fil conducteur dépend et de la qualité propre des forces chimiques ou calorifiques qui se transforment en électricité et de la nature même du conducteur.

L'expérience montre de la façon la plus nette qu'à mesure que l'on augmente la longueur du circuit que doit traverser le courant fourni par une même pile, l'électricité de ce courant diminue. La variation produite dépend d'ailleurs de diverses circonstances. Ainsi, par exemple, la diminution est plus marquée quand, toutes choses égales d'ailleurs, on emploie un fil de fer au lieu d'un fil de cuivre; de même, l'affaiblissement est plus prononcé avec des fils fins qu'avec des fils de même nature, mais de section plus grande. On est donc conduit à penser que le courant a une intensité propre en rapport avec le mode de transformation des forces qui le produisent, et que cette intensité se trouve modifiée par le circuit qui oppose au mouvement de l'électricité une sorte de résistance spéciale. Ce circuit ne se compose pas seulement des conducteurs extérieurs à l'appareil rhéométrique, il comprend cet appareil lui-même avec tous les éléments complexes qui peuvent entrer dans sa composition. S'il s'agit d'une pile hydro-électrique, par exemple, il faut considérer les liquides et les métaux qui la constituent comme jouant deux rôles : celui d'électromoteurs donnant naissance au courant, et celui de conducteurs modifiant par leur résistance l'intensité de ce courant lui-même.

Bien que, en fait, on ne puisse se représenter un courant que comme existant dans un certain circuit, l'esprit peut distinguer la nature proprement électrique de l'action qui engendre le courant, de l'action physique spéciale qui en établit, si on peut s'exprimer ainsi, le régime.

On peut donc représenter l'intensité d'un courant contenu dans un certain circuit par la formule

$$F = \frac{E}{R},$$

dans laquelle E désigne ce que l'on appelle la force électromotrice, et R la résistance totale du circuit. C'est cette formule qui constitue la loi de Ohm. D'une remarquable simplicité, elle permet d'interpréter avec une fidélité parfaite toutes les circonstances qui peuvent se présenter dans l'association des piles et des conducteurs, et elle a donné lieu à une théorie physique de la pile dont on a fait déjà plusieurs applications heureuses[1].

539. Identité du courant dans les diverses parties du circuit. — La résistance varie d'un point à un autre du circuit quand celui-ci n'est point homogène, mais il est important de remarquer que l'intensité du courant est la même partout. On s'en assure en faisant osciller une aiguille aimantée à une très-petite distance au-dessus des différents points du conducteur; on constate que le nombre des oscillations effectuées dans le même temps est toujours le même, ce qui veut dire que la force qui produit l'oscillation est constante. Or, cette force est la résultante de l'action de la terre et de celle du courant; comme la première est constante, il en est de même de la seconde.

Il y a dans ce fait quelque chose d'analogue à ce qui se passe quand il s'agit de vider un bassin contenant de l'eau. La nature des conduites employées modifie le débit de liquide et, par suite, le temps nécessaire à l'épuisement complet; mais pour chaque sys-

1. Les travaux de Ohm sont consignés dans un ouvrage publié en 1827. Rédigé avec beaucoup d'obscurité, basé d'ailleurs sur des idées théoriques contestables, l'ouvrage se répandit peu, et, plusieurs années après, M. Pouillet arrivait par une méthode purement expérimentale aux conclusions du savant allemand, sans avoir eu connaissance de ses recherches.

tème, une fois le régime d'écoulement établi, il passe en chaque point la même quantité d'eau dans le même temps. De même, la quantité totale d'électricité que sont capables de fournir les substances rhéomotrices peut circuler pendant un temps plus ou moins long, suivant la nature du circuit dans lequel s'établit le courant.

540. Éléments qui influent sur la résistance. — La résistance d'un fil conducteur augmente avec sa longueur; elle diminue, la longueur restant la même, quand la section augmente. Pour apprécier la mesure de ces variations, on peut employer l'appareil suivant :

Le courant produit par une pile P (fig. 465) est introduit dans un circuit qui contient une boussole rhéométrique B. On commence par réunir les extrémités des rhéophores à l'une des deux petites pièces métalliques *a* et *b*. On mesure dans ce cas l'intensité du courant produit. On fait communiquer alors l'un des rhéophores avec *b* et l'autre avec *a* et on complète le circuit par le fil conducteur *m*; le courant diminue d'intensité et l'aiguille de la boussole se déplace d'un certain nombre de degrés. Si l'on remplace le fil *m* par un autre de même nature, mais d'une longueur plus grande, la diminution d'intensité est plus marquée; elle l'est moins si le fil, conservant la même longueur, a une section plus grande. Or, si on prend deux fils de même nature, dont l'un ait à la fois une section et une longueur doubles de celle de l'autre, on reconnaît que ces deux fils peuvent se remplacer exactement dans le circuit, qu'ils produisent le même affaiblissement dans le courant, c'est-à-dire qu'ils ont la même résistance.

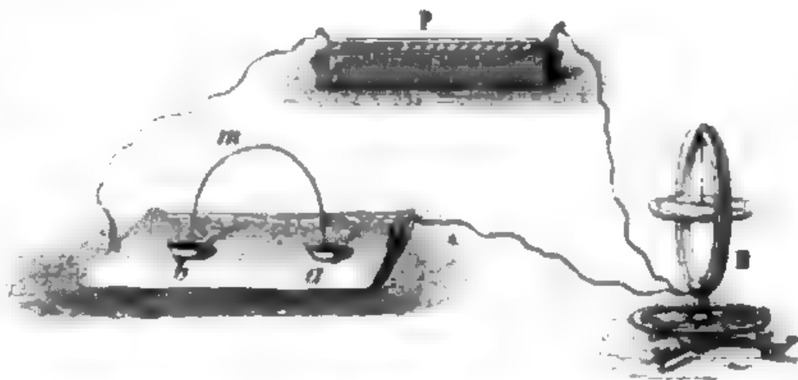


Fig. 465. — Comparaison des résistances.

La même chose a lieu quelles que soient les longueurs et les sections des fils, pourvu qu'il y ait entre ces deux éléments un rapport constant, c'est-à-dire que l'on ait

$$\frac{l}{s} = \frac{l'}{s'} = \frac{l''}{s''} \cdots\cdots,$$

s, s', s'', . . . représentant les sections, l, l', l'', . . . les longueurs des fils employés.

Si l'on établit la communication entre a et b à l'aide de fils métalliques de nature différente, les conditions de l'équivalence se trouvent changées ; c'est qu'en effet la résistance est quelque chose de spécifique, puisqu'elle dépend évidemment de la constitution moléculaire du conducteur traversé par le courant.

541. Lois de l'intensité d'un courant dans un circuit homogène. — On est conduit à penser, d'après ces expériences, que la résistance d'un circuit homogène est proportionnelle à la longueur et inversement proportionnelle à la section, de sorte que l'on peut la représenter par l'expression

$$R = \frac{lr}{s},$$

dans laquelle r représente la résistance spécifique. Il suit de là, d'après la loi de Ohm, que l'intensité du courant qui traverse un pareil circuit doit être proportionnelle à la section et inversement proportionnelle à la longueur. Ce résultat peut être établi expérimentalement d'une façon très-rigoureuse. Voici les expériences faites à ce sujet par M. Pouillet :

1° *Courants thermo-électriques.* — On se sert de deux éléments thermo-électriques, bismuth et cuivre (fig. 466), placés à côté l'un de l'autre, de façon qu'on puisse simultanément plonger les soudures voisines les unes dans de la glace fondante, les autres dans de l'eau à 100°, par exemple. Le circuit de l'un des couples est formé par un fil de cuivre dont une partie s'enroule un certain nombre de fois autour du cadre d'un galvanomètre ; l'autre circuit du même fil, dix fois plus long, s'enroule à côté du premier, mais en faisant un nombre de tours dix fois plus considérable. Si dans ces circonstances on établit les communications de telle sorte que les deux courants circulent en sens contraire dans le galvanomètre, on voit que l'aiguille demeure au zéro. Il faut en conclure que les deux actions contraires qui la sollicitent se font équilibre ; mais le fil dont la longueur est dix fois plus considérable fait dix fois plus de tours sur le galvanomètre : c'est donc

que l'intensité du courant qui le traverse est dix fois plus faible.

La loi des sections peut se démontrer d'une manière analogue en employant deux fils de même longueur, mais ayant l'un une section double de celle de l'autre; on reconnaît que ce dernier a besoin de deux fois plus de tours pour produire le même effet que le premier. Dans ces expériences, on ne compte que la longueur des fils de cuivre, et on néglige celle du cylindre de bismuth, dont la résistance est effectivement très-faible à cause de sa grande section.

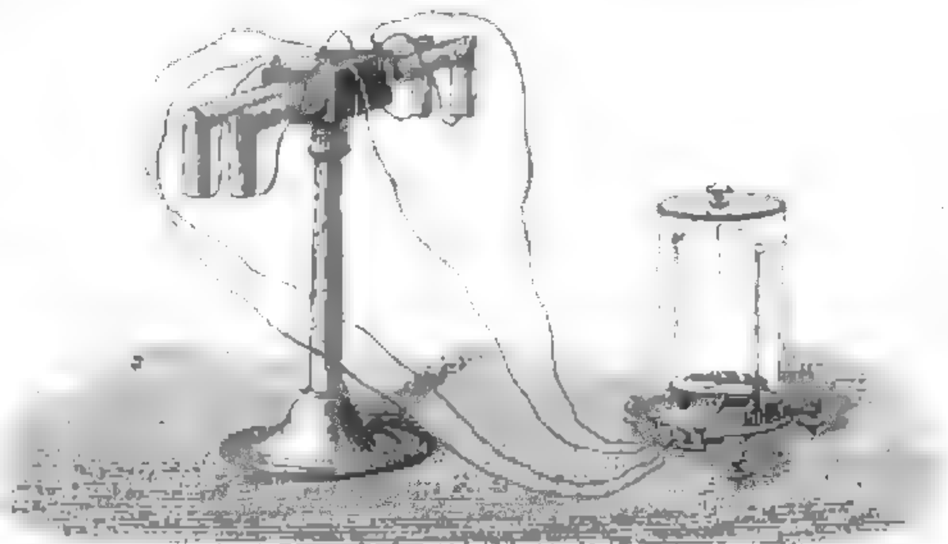


Fig. 466.

2° *Courants hydro-électriques.* — On se sert d'une pile dans le circuit de laquelle se trouve une boussole qui donne l'intensité initiale F du courant. On introduit ensuite successivement des longueurs $a, b, c, \ldots$ d'un fil de cuivre déterminé; les intensités décroissent successivement et deviennent $F', F'', F''' \ldots\ldots$ Si nous appelons x la longueur du fil de cuivre employé qui serait équivalente par sa résistance à celle du circuit primitif, les intensités $F, F', F'', F''' \ldots$ se rapportent aux longueurs $x, x+a, x+b, x+c \ldots$ et l'on doit avoir les relations

$$\frac{F}{F'} = \frac{x+a}{x}, \quad \frac{F}{F''} = \frac{x+b}{x}, \quad \frac{F}{F'''} = \frac{x+c}{x}.$$

Si la loi qu'il s'agit de démontrer est vraie, on doit tirer de ces diverses relations la même valeur de x. C'est en effet ce qui a lieu.

En opérant avec une nouvelle série de fils de cuivre d'une section double, on obtient encore une même valeur de x, mais celle-ci se trouve égale à la moitié de celle qui a été trouvée précédemment, ce qui démontre que la loi des sections s'applique aussi aux courants hydro-électriques.

542. Longueur réduite. — Résistance totale d'un circuit

hétérogène. — Il suit de ce qui précède que la résistance d'une portion de circuit est effectivement représentée, ainsi que nous l'avons dit plus haut, par la formule $\frac{rl}{s}$. Une autre portion de nature différente serait représentée par $\frac{r'l'}{s'}$, et la longueur du premier fil qui lui serait équivalente serait donnée par la relation

$$\frac{rl}{s} = \frac{r'l'}{s'}, \quad \text{d'où} \quad l = \frac{s}{r} \cdot \frac{r'l'}{s'}.$$

C'est là ce qu'on appelle la *longueur réduite* de la seconde portion du circuit. On aurait de même pour les diverses portions d'un circuit hétérogène :

$$l_1 = \frac{s}{r} \cdot \frac{r''l''}{s''}, \qquad l_2 = \frac{s}{r} \cdot \frac{r'''l'''}{s'''} \dots\dots$$

Si l'on imagine que le courant circule dans ce circuit, son intensité sera la même que dans un circuit homogène de longueur $l + l_1 + l_2 \dots\dots$ et la résistance totale sera exprimée par

$$\frac{r}{s}\left(l + \frac{s}{r} \cdot \frac{r'l'}{s'} + \frac{s}{r} \cdot \frac{r''l''}{s''} + \dots\dots\right),$$

qui se réduit à

$$\frac{rl}{s} + \frac{r'l'}{s'} + \frac{r''l''}{s''} + \dots\dots$$

c'est-à-dire que la résistance totale d'un circuit hétérogène est égale à la somme des résistances partielles. C'est cette résistance totale que nous avons appelée R dans la formule de Ohm, de même que E représente la somme des forces électromotrices qui s'exercent en différents points du circuit et produisent le courant.

543. Mesure des résistances spécifiques. — L'appareil décrit plus haut (540) peut servir à mesurer les résistances spécifiques des différents corps conducteurs; il suffit en effet de chercher pour chacun de ces corps la longueur équivalente d'un certain fil de cuivre que l'on convient de prendre pour terme de comparaison. De la formule $\frac{rl}{s} = \frac{r'l'}{s'}$ qui exprime l'égalité de résistance des parties que l'on compare, on déduira le rapport $\frac{r'}{r}$.

On peut aussi se servir pour cette mesure d'un appareil ingénieux dû à M. Wheatstone, et qui est propre d'ailleurs à diverses recherches : c'est le rhéostat.

Il se compose (fig. 467) de deux cylindres horizontaux A et B, mobiles autour de leur axe et placés parallèlement. Le cylindre A est entièrement métallique, l'autre est enveloppé d'une matière isolante à la surface de laquelle se trouve creusée une rainure hélicoïdale à pas très-petit. Un fil très-mince en cuivre doré fixé à l'une des extrémités de ce dernier cylindre s'enroule en partie dans la rainure, et de là passe sur le second cylindre. L'enroulement se continue du côté opposé et peut se terminer à l'extrémité opposée du cylindre métallique. Deux bornes métalliques sont en communication, l'une avec le cylindre en métal, l'autre avec l'extrémité du fil fixé sur le cylindre à surface isolante.

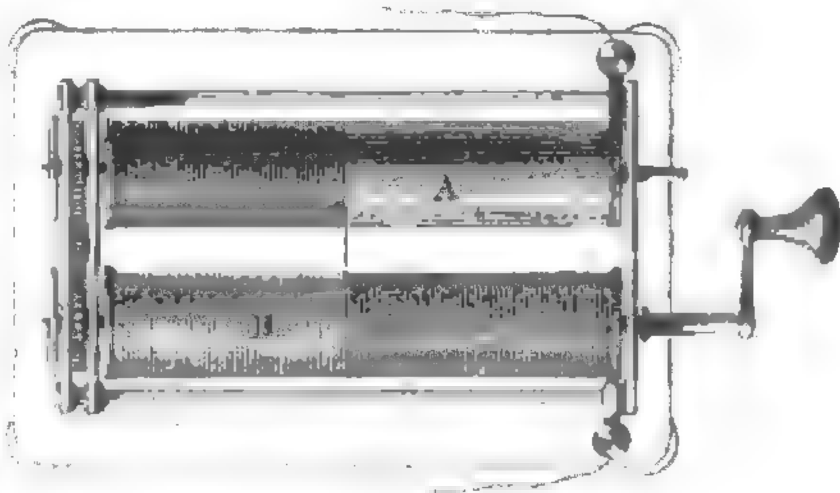


Fig. 467. — Rhéostat de M. Wheatstone.

Supposons que l'on introduise l'appareil dans le circuit d'un courant, celui-ci sera obligé de suivre les diverses circonvolutions du fil enroulé dans la rainure et éprouvera une résistance en rapport avec la longueur de ce fil; quant à la résistance provenant du cylindre en métal, elle pourra, à cause de la grande section de ce dernier, être tout à fait négligée devant celle qu'oppose le restant du circuit. A l'aide d'une manivelle qui se place à volonté sur l'axe de l'un ou de l'autre cylindre, on peut enrouler le fil sur la surface de l'un, tandis qu'il se déroule sur la surface de l'autre. On peut ainsi introduire dans le circuit ou en enlever une longueur variable du fil. Un compteur placé en tête de l'appareil donne le nombre de tours de cette longueur de fil; les fractions de tour s'apprécient approximativement; il serait d'ailleurs très-simple d'ajouter un organe qui permette de les mesurer exactement.

D'après cette description, il est facile de comprendre l'emploi de l'instrument à la mesure des résistances spécifiques; il suffit de l'in-

troduire avec une boussole B dans un circuit (fig. 468) dont une partie peut être constituée par un conducteur variable *m*. Les deux pièces *a* et *b* étant d'abord mises directement en contact, l'introduction du conducteur *m* produit une diminution d'intensité accusée par le déplacement de l'aiguille de la boussole.

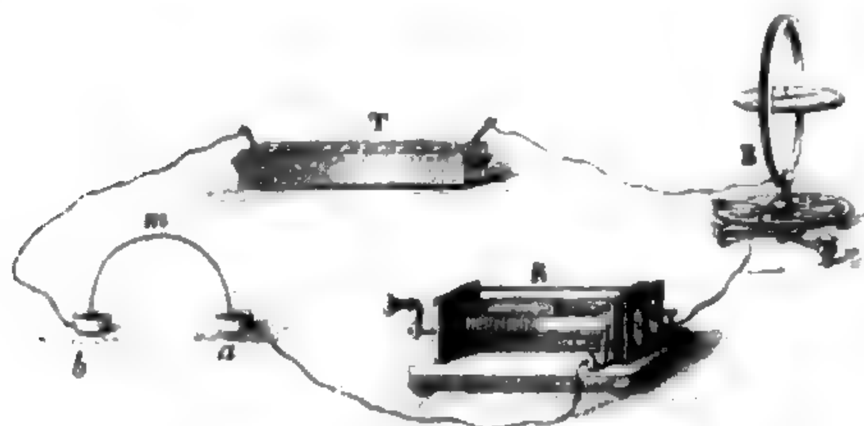


Fig. 468. — Mesure des résistances spécifiques.

On remet alors les communications dans l'état initial, et on introduit dans le circuit la longueur de fil du rhéostat nécessaire pour produire le même résultat.

A l'aide d'expériences de ce genre on a pu dresser la liste des résistances spécifiques des différents métaux. La table suivante résulte des travaux de M. Ed. Becquerel :

RÉSISTANCES SPÉCIFIQUES A LA TEMPÉRATURE DE 15°.

Argent.	107,00	Palladium.	714,59
Cuivre.	112,25	Fer.	824,89
Or.	155,31	Plomb.	1212,90
Cadmium.	406,94	Platine.	1243,47
Zinc	413,84	Mercure.	5550,15
Étain.	734,26		

La résistance spécifique est évidemment une propriété inverse de la conductibilité, et la table précédente, dans laquelle la résistance va en croissant, marque précisément l'ordre du pouvoir conducteur des différents métaux. On remarquera que cet ordre est précisément le même que celui qui a été indiqué dans le chapitre XXX, relativement à la conductibilité pour la chaleur. En modifiant convenablement le mode d'expérience qui vient d'être indiqué, on peut observer la résistance à des températures diverses; on trouve ainsi qu'à un petit nombre d'exceptions près, la résistance augmente avec la température.

544. Résistance des liquides. — Un procédé d'expérimentation analogue peut servir à déterminer la résistance spécifique des liquides.

A cet effet, on introduit dans le circuit une éprouvette (fig. 469), d'un diamètre connu, contenant le liquide à étudier. Une plaque de métal B, d'un diamètre à peu près égal à celui de l'éprouvette, est disposée dans une position fixe à la partie inférieure de l'éprouvette; une deuxième plaque pareille A peut s'élever ou s'abaisser dans le liquide, de façon à faire varier la longueur de la colonne liquide contenue entre elles. On produit ainsi une certaine variation d'intensité, qu'on reproduit ensuite soit avec un fil métallique, soit avec une colonne de mercure de longueur convenable. Il est très-importaut dans ces expériences de se mettre à l'abri des phénomènes électrochimiques qui se produisent au contact du liquide et du métal. On se sert du métal contenu dans la dissolution, du cuivre par exemple, si l'on opère sur le sulfate de cuivre, de sorte qu'il ne se produise aucun gaz à l'électrode négative et que le liquide se régénère à l'électrode positive. Il convient d'ailleurs d'opérer toujours avec des courants de faible intensité.

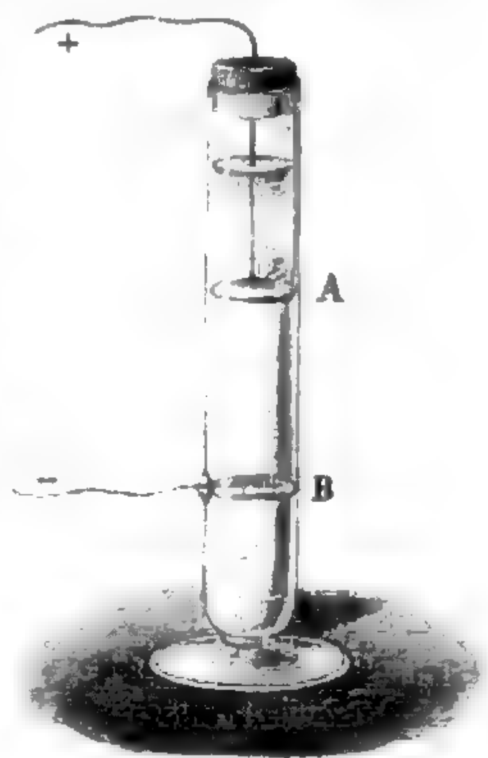


Fig. 469. — Mesure de la résistance des liquides.

On a constaté ainsi que la résistance des liquides est incomparablement plus considérable que celle des métaux; ainsi, par exemple, la résistance spécifique d'une dissolution de sulfate de cuivre est près de 18 000 000 de fois plus grande que celle de l'argent. Ce fait explique pourquoi les courants thermo-électriques s'affaiblissent au point de disparaître dans les liquides; ce n'est pas que dans le milieu où ils naissent ils soient trop faibles, mais avec l'addition de circuits liquides, dont la résistance est énorme, leur intensité éprouve une diminution proportionnelle et devient inappréciable.

545. Application du rhéostat à la graduation du galvanomètre. — On peut se servir du rhéostat pour graduer un galvanomètre à fil long. A cet effet, on introduit les deux instruments dans un circuit et on règle les résistances diverses pour que l'aiguille du galvanomètre s'arrête aux premières divisions, la totalité du fil du

rhéostat étant enroulée sur le cylindre isolant. On supprime ensuite successivement diverses longueurs l, l', l'' du fil ; l'intensité du courant augmente, l'aiguille éprouve des déviations de plus en plus considérables et qui s'approchent plus ou moins de 90°. Si l'on désigne par f l'intensité du courant primitif qu'on peut prendre pour unité, par r la résistance initiale exprimée en fil du rhéostat, on aura, pour déterminer les intensités successives f', f'', les relations

$$\frac{f'}{f} = \frac{r}{r+l}, \qquad \frac{f''}{f} = \frac{r}{r+l'} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$$

Il suffira, pour avoir les rapports que forment les premiers membres, de déterminer la résistance r, ce qui se fait soit à l'aide du rhéostat lui-même, soit à l'aide d'expériences analogues à celles qui ont été précédemment décrites.

546. Intensité du courant de la pile. — La formule de Ohm permet de calculer l'intensité du courant fourni par une pile en fonction de l'intensité individuelle du courant de chaque élément. Supposons, pour plus de simplicité, que tous les éléments aient la même résistance r et une même intensité exprimée par f lorsqu'ils sont mis en rapport avec un conducteur extrapolaire contenant une boussole et d'une résistance totale égale à φ ; l'intensité f est donnée par la formule

$$f = \frac{E}{r+\varphi}.$$

Les éléments étant réunis en pile, la résistance du circuit devient $nr + \varphi$, et les courants particuliers s'ajoutant ensemble, on a pour l'intensité totale F :

$$F = \frac{nE}{nr+\varphi}, \quad \text{d'où} \quad \frac{F}{f} = \frac{nr+n\varphi}{nr+\varphi}.$$

Cette formule donne des résultats conformes à l'expérience, ainsi que l'ont établi divers observateurs et en particulier M. Pouillet ; elle nous montre que si le conducteur extrapolaire a une résistance considérable, le nombre des éléments a une grande influence sur l'intensité; si au contraire φ est très-faible, et pour ainsi dire négligeable devant nr, l'accroissement du nombre des éléments

n'ajoute rien à l'intensité, dont l'expression est dans ce cas limite indépendante de n.

Ce cas se présente, par exemple, lorsqu'il s'agit de faire circu-

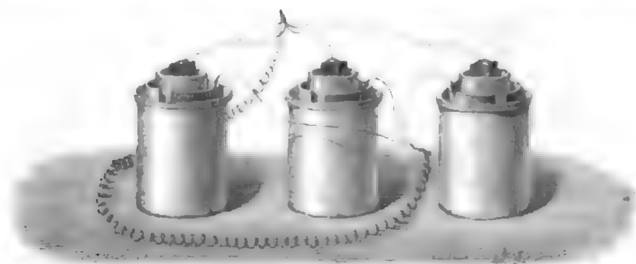


Fig. 470. — Éléments en batterie.

ler le courant d'une pile hydro-électrique dans un fil métallique d'une petite longueur. Il vaut mieux alors disposer les éléments de la pile *en batterie*. A cet effet, on réunit, comme le montre la figure 470, tous les charbons et tous les zincs ensemble, ce qui donne comme un élément unique d'une très-grande surface. On peut calculer l'intensité du courant qui résulte de cette disposition; en effet, on a comme précédemment

$$F = \frac{E}{r + \rho}.$$

Les éléments étant réunis, l'élément unique formé a une section n fois plus grande et par suite une résistance n fois plus petite; on a donc

$$F = \frac{E}{\frac{r}{n} + \rho} = \frac{nE}{r + n\rho},$$

d'où

$$\frac{F}{f} = \frac{nr + n\rho}{r + n\rho};$$

d'où on voit, ainsi que nous l'avions déduit de la formule précédente, que si ρ est très-petit, F est sensiblement proportionnel à n, c'est-à-dire que la disposition en batterie est très-favorable dans cette circonstance.

547. Courants dérivés. — Lorsqu'on pratique une dérivation sur un circuit, le courant se partage entre les deux conducteurs, et il est facile de calculer, en fonction de l'intensité primitive, l'inten-

sité des deux courants dans lesquels il se décompose. Soient r et r' les résistances du fil primitif bda et du fil dérivé bca, f et f' leurs

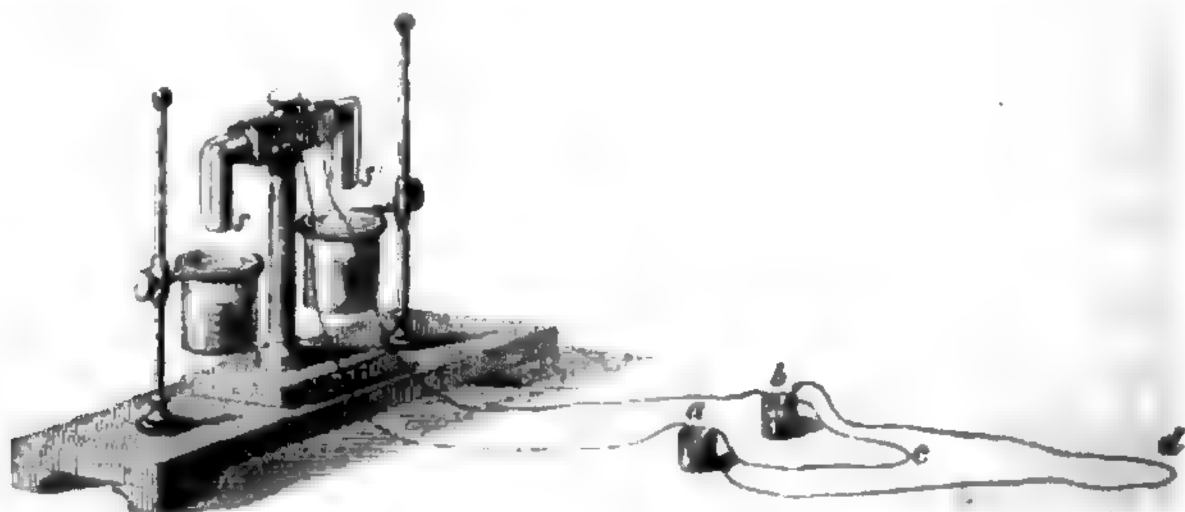


Fig. 171. — Courants dérivés.

intensités respectives et φ l'intensité du courant principal, c'est-à-dire de celui qui circule dans la portion du fil située entre les points de dérivation a et b et la source ss', on a évidemment :

$$\varphi = f + f', \quad \frac{f}{f'} = \frac{r'}{r}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{\varphi r'}{r + r'}, \quad f' = \frac{\varphi r}{r + r'}.$$

Quant à la valeur de φ, on la calcule facilement en remarquant que les deux fils de résistance r et r' peuvent être considérés comme ayant une même longueur égale à l'unité, un pouvoir conducteur aussi égal à 1 et des sections $\frac{1}{r}$ et $\frac{1}{r'}$; ils forment donc un fil de section $\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}$ et par suite d'une résistance égale à

$$\frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}} = \frac{rr'}{r + r'}.$$

L'intensité du courant principal est donc

$$\varphi = \frac{E}{R + \frac{rr'}{r + r'}},$$

R désignant la résistance de la portion antérieure du circuit ; mais le courant primitif avait pour intensité $F = \frac{E}{R + r}$, donc

$$\frac{\varphi}{F} = \frac{R + r}{R + \frac{rr'}{r + r'}}, \quad \text{d'où} \quad \varphi = F \frac{(R + r)(r + r')}{rr' + R(r + r')},$$

et par suite les valeurs f et f' trouvées plus haut deviennent

$$f = F\frac{(R+r)r'}{rr' + R(r+r')}, \qquad f' = F\frac{(R+r)r}{rr' + R(r+r')}.$$

Ces formules trouvent une application dans la discussion des meilleures conditions d'isolement des lignes télégraphiques.

548. Choix du galvanomètre. — Le galvanomètre a ordinairement pour objet, ainsi que nous l'avons dit dans le chapitre précédent, de rendre sensible un courant dont l'intensité originelle serait insuffisante pour dévier l'aiguille aimantée; examinons, à l'aide de la théorie de Ohm, les conditions pour que ce résultat soit atteint. Dans le milieu où il se produit avec une résistance ρ, le courant a pour intensité

$$f = \frac{E}{\rho}.$$

Par l'addition du circuit galvanométrique la résistance devient $nr + \rho$, n désignant le nombre des spires et r la résistance de chacune d'elles. D'ailleurs l'action sur l'aiguille aimantée se trouvant multipliée par n, l'intensité efficace du courant est exprimée par la formule

$$F = \frac{nE}{nr+\rho}, \quad \text{d'où} \quad F = f\frac{n\rho}{nr+\rho}.$$

On voit que si nr est du même ordre de grandeur que ρ, c'est-à-dire si la résistance initiale est considérable, l'intensité F s'accroît avec n et se trouve toujours supérieure à f. Dans ce cas, qui est celui des courants hydro-électriques, il conviendra d'avoir un grand nombre de spires, c'est-à-dire de prendre un galvanomètre à fil fin et long.

Si au contraire ρ se trouve très-petit, si par exemple il est négligeable devant nr, la valeur de F devient $f\frac{\rho}{r}$, c'est-à-dire que le courant devient inappréciable. C'est ce qui arrive quand on lance un courant thermo-électrique dans un galvanomètre à fil long. Pour échapper à cet inconvénient, il faut diminuer autant que possible la valeur de r, ce qui s'obtient en augmentant la section du fil et diminuant le nombre des spires, c'est-à-dire en employant un gal-

vanomètre à fil gros et court. Il faut toutefois laisser à n une certaine valeur afin de profiter de la multiplication ; le nombre n, qui convient au maximum d'effet dans chaque cas particulier, dépend de la valeur effective des résistances : on ne saurait le calculer d'une manière générale.

549. Mesure des forces électromotrices. — La formule générale de Ohm $F = \frac{E}{R}$ montre que, si l'on peut mesurer à la fois et l'intensité d'un courant et la résistance du circuit qu'il traverse, on pourra en déduire la valeur de E. Des expériences faites avec des couples de systèmes différents peuvent ainsi donner la valeur de la force électromotrice de chacun d'eux par rapport à celle d'un système que l'on choisira pour type ou pour unité.

Divers procédés d'expérimentation ont été appliqués à cette recherche. La figure 472 représente la disposition générale de l'ap-

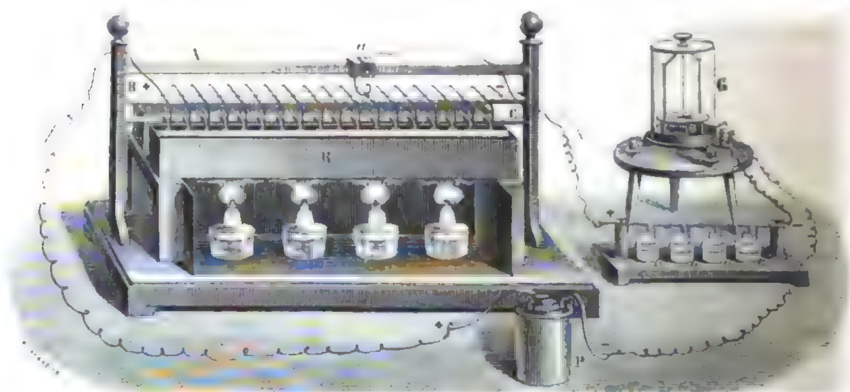


Fig. 472. — Mesure des forces électromotrices.

pareil employé par M. Jules Regnault. Une pile thermo-électrique A, de 60 éléments bismuth et cuivre, et l'élément P que l'on veut lui comparer, envoient dans un galvanomètre deux courants de sens contraire ; le curseur *a* permet de n'engager que le nombre que l'on veut des éléments de la pile. On conçoit, par conséquent, qu'en faisant varier la position du curseur, on puisse arriver à amener au zéro l'aiguille du galvanomètre. Dans ce cas, l'intensité du courant résultant est nulle, ce qui veut dire que les courants élémentaires sont égaux et contraires ; mais, comme ils ont à traverser l'un et

l'autre une même résistance, on peut dire que les forces électromotrices qui leur sont propres sont égales. La force électromotrice de l'élément soumis à l'expérience est donc représentée par un nombre égal à celui des couples thermo-électriques qui ont pris part à l'action.

Comme les éléments hydro-électriques ont une force électrique très-supérieure aux éléments thermo-électriques, la pile employée ne suffirait pas à les équilibrer ; on emploie alors un ou plusieurs couples auxiliaires *o*, *o* dont la force a été préalablement déterminée. C'est ainsi, par exemple, qu'on a reconnu qu'un élément de Daniell, chargé au sulfate de zinc et au sulfate de cuivre, a une force égale à celle de 174 couples bismuth et cuivre dont les soudures sont chauffées à 0 et à 100°.

550. Quantité d'électricité. — Il est difficile de définir exactement ce qu'on entend par quantité d'électricité; toutefois il est bien clair que si un courant possède une intensité constante, les quantités d'électricité doivent être proportionnelles aux temps pendant lesquels le courant circule. On peut arriver d'une autre manière à cette comparaison de quantités. Supposons un circuit dans lequel se trouve intercalée une roue métallique dentée; les intervalles entre les dents sont remplis par une matière isolante. Le circuit communiquant d'une part à l'axe métallique de la roue et de l'autre à une des dents de la circonférence, le courant passera librement. Mais si on vient à faire tourner la roue, il y aura une série d'interruptions, et l'aiguille d'une boussole faisant partie du circuit éprouvera des oscillations plus ou moins marquées. Lorsque la vitesse de rotation est suffisante, on reconnaît que l'aiguille se fixe à une position déterminée. Si, par exemple, les dents et les parties isolantes ont la même largeur, on devra admettre comme évident que la quantité d'électricité qui passe est la moitié de celle qui circule lorsque la communication est libre. Or la déviation produite indique que le courant produit dans ce second cas a précisément une intensité égale à la moitié de celui qui a lieu dans le premier. On peut donc dire que *l'intensité d'un courant est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la quantité d'électricité qui le constitue.*

CHAPITRE XLVIII.

ÉLECTRO-DYNAMIQUE.

551. Actions mutuelles des courants. — L'action d'un courant sur une aiguille aimantée indique entre le magnétisme et l'électricité une corrélation des plus étroites; cette corrélation avait pu être entrevue déjà d'après la perturbation que les coups de foudre ou les fortes décharges électriques amènent dans le magnétisme des aiguilles. Mais les faits de ce genre qui avaient été observés manquaient de précision, ils étaient surtout insuffisants pour faire ressortir la loi ou même le sens général des phénomènes. L'expérience d'Œrstedt avait un tout autre caractère. La déviation de l'aiguille aimantée par le courant se fait dans un sens déterminé, facile à prévoir et à formuler à l'avance. Aussi Ampère n'hésita pas dès l'origine à assigner à l'électricité et au magnétisme une origine identique. Remarquant que les aimants agissent mutuellement les uns sur les autres, il supposa qu'il devait en être de même de l'action des courants sur les aimants, si bien que si les aimants étaient fixes et les courants mobiles, ceux-ci devaient se placer, par rapport aux premiers, de façon que la règle gé-

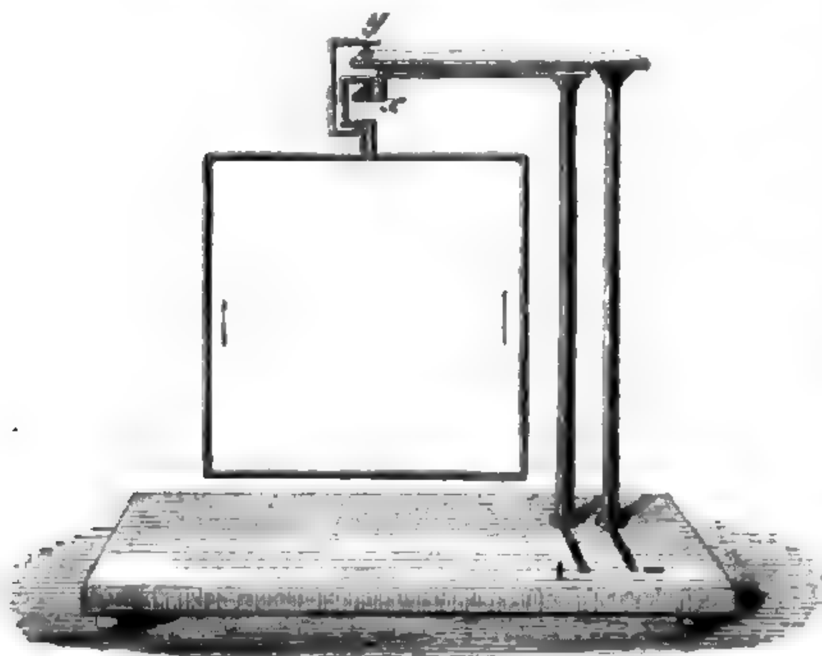


Fig. 473. — Moyen de rendre un courant mobile.

nérale posée plus haut (531) se trouve satisfaite. Le problème de rendre un conducteur mobile, sans interrompre le courant, présentait des difficultés considérables, que le génie d'Ampère parvint à résoudre. La disposition à laquelle il s'arrêta est représentée par la figure 473. Deux colonnes métalliques présentent à leur partie supérieure deux lames horizontales qui se terminent par deux coupes x et y placées sur une même verticale. Un fil métallique contourné en rectangle, par exemple, se termine par deux pointes, qui se trouvent sur l'axe de symétrie du conducteur, c'est-à-dire sur la ligne qui contient le centre de gravité. D'après cela, si on place les pointes sur les coupes, le rectangle sera équilibré et par suite parfaitement mobile autour de la ligne des pointes elles-mêmes. Il suffit dès lors de placer du mercure dans les coupes et de faire arriver un courant par les colonnes pour que celui-ci circule dans le conducteur, qui pourra d'ailleurs se mouvoir sans amener aucune interruption.

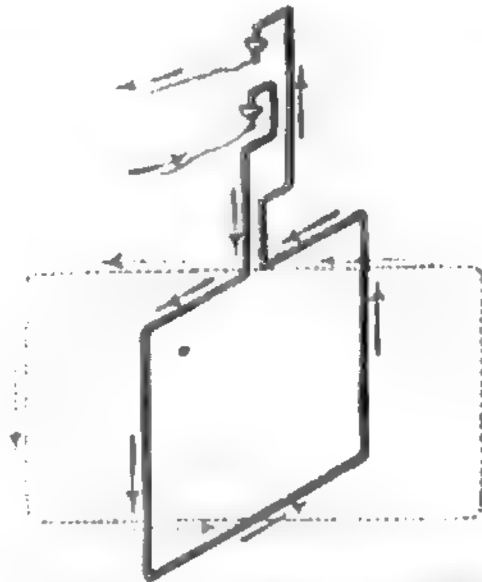


Fig. 474. — Action d'un aimant sur un courant mobile.

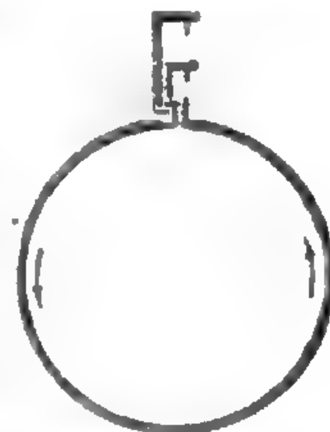


Fig. 475.

Au lieu d'employer un courant rectangulaire, on peut suspendre dans l'appareil un courant circulaire (fig. 475) ou de toute autre forme. Il est alors facile de constater l'action mutuelle de l'aimant et du courant; il suffit de placer un aimant AB (fig. 474) au-dessous du conducteur mobile, on voit celui-ci dévier, se placer en croix avec l'aimant et de façon que le pôle austral soit à gauche.

552. Actions mutuelles des courants. — L'identité supposée du magnétisme et de l'électricité conduit naturellement à admettre que les courants doivent agir les uns sur les autres. Ampère réussit non-seulement à mettre ce fait en évidence, mais il en multiplia les

manifestations et créa ainsi de toutes pièces une branche de la physique à laquelle on donne le nom d'*électro-dynamique* et qui peut certainement être considérée comme la plus grande conception scientifique depuis Newton. L'apppareil à l'aide duquel il put exécuter toutes les expériences qui devaient servir de base à sa théorie est une véritable merveille de sagacité, il se rencontre encore dans quelques cabinets de physique et porte le nom de *table d'Ampère*. Pour la commodité de l'enseignement, on préfère se servir aujourd'hui d'appareils distincts dont la première idée est due à M. Pouillet et qui sont destinés chacun à la démonstration d'un phénomène particulier. C'est à l'aide de ces appareils que nous allons expliquer quelques-unes des propositions fondamentales de l'électro-dynamique.

I. Les parties d'un même courant se repoussent. — Pour démontrer ce fait, on se sert d'une petite caisse rectangulaire (fig. 476) divisée en deux compartiments par une cloison. Dans chacun des compartiments on place du mercure bien propre et on les fait communiquer l'un avec l'autre par un fil de laiton posant sur le mercure et recourbé au-dessus de la cloison. Lorsque dans ces circonstances on met les deux pôles d'une pile en communication avec les deux cases, on voit le petit conducteur mobile repoussé vers le fond de la caisse.



Fig. 476. — Répulsion des parties d'un même courant.

II. Deux courants parallèles dirigés dans le même sens s'attirent; deux courants parallèles dirigés en sens contraire se repoussent. — L'appareil employé à démontrer cette double proposition se compose des deux colonnes métalliques *t* et *v* (fig. 477), communiquant supérieurement avec des lames qui se terminent par les coupes *x* et *y*. On dispose sur ces coupes remplies de mercure le conducteur rectangulaire mobile *abcde*. On voit sur la figure que si l'on place les côtés verticaux du rectangle dans le voisinage des colonnes, les courants dirigés dans ces deux systèmes sont de même sens. Aussi en plaçant les côtés mobiles à une petite distance des colonnes, on voit, dès que le courant passe, se manifester une attraction.

Pour constater la répulsion, on emploie le rectangle (fig. 478) plié autrement; les courants des colonnes sont alors en regard de courants mobiles dirigés en sens inverse; aussi, quand on place ces derniers tout près des colonnes et que l'on fait arriver le courant,

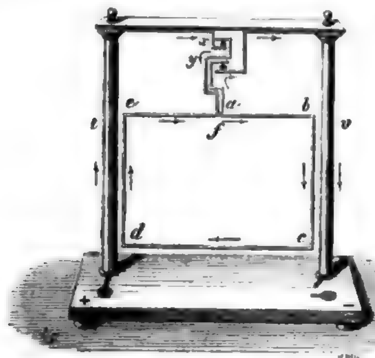


Fig. 477. — Actions mutuelles des courants parallèles.

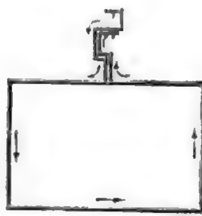


Fig. 478.

on voit une vive répulsion se produire et le rectangle tournerait de 180° s'il n'était empêché par le contact des pièces qui supportent les coupes.

III. Les courants angulaires s'attirent lorsqu'ils sont tous les deux dirigés vers le sommet de l'angle ou que tous les deux s'en éloignent; ils se repoussent lorsque, l'un s'approchant du sommet de l'angle, l'autre s'en éloigne.

Au lieu de démontrer directement la proposition dans les différents cas qu'elle comporte, on peut vérifier une conséquence très-simple à laquelle elle conduit.

Supposons les deux courants AB et CD (fig. 479) se croisant au point O, et voyons quel sera le résultat de leurs actions mutuelles. D'après la proposition qu'il s'agit de démontrer, il y aura attraction dans les deux angles AOD et COB, répulsion dans les angles DOB et COA. Ces quatre actions sont évidemment concordantes pour faire tourner les courants de façon qu'ils se placent parallèlement l'un à l'autre et dans le même sens.

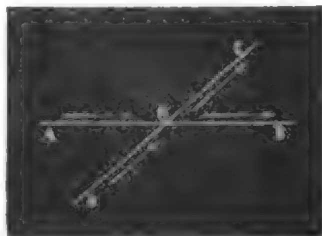


Fig. 479. — Actions des courants angulaires.

Cette conséquence se vérifie très-aisément de la manière suivante. A l'appareil déjà décrit (fig. 473 et 474) on suspend un conducteur rectangulaire dont le côté inférieur horizontal est placé au-dessus d'un conducteur fixe de manière à faire un angle avec lui. Aussitôt que l'on fait passer le courant dans l'appareil, le conducteur mobile se met en mouvement et se place parallèlement au conducteur fixe. On reconnaît, en outre, facilement que le courant est de même sens dans les parties qui agissent l'une sur l'autre, conformément à ce qui vient d'être indiqué.

553. Action d'un courant circulaire sur un courant fini mobile autour de son extrémité. — La proposition précédente conduit à quelques conséquences qu'il est utile de connaître.

Supposons, par exemple, un courant fini OA (fig. 480), mobile autour de son extrémité O et soumis à l'action d'un courant circulaire. Considérons d'abord le cas où le courant va du centre à la circonférence. Il est visible, d'après ce qui précède, que la portion du courant qui est située au-dessus du courant fixe OA l'attire, tandis qu'il est repoussé par la portion qui est au-dessous; le courant fini tournera donc d'une manière continue. Le mouvement de rotation sera d'ailleurs de sens contraire à celui du courant circulaire. Le contraire aurait lieu évidemment si le courant fini allait de la circonférence au centre.

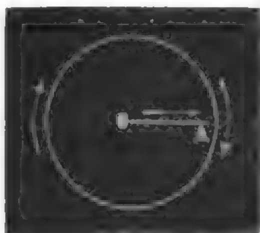


Fig. 480.

La figure est faite comme si le courant OA et le courant circulaire étaient dans le même plan; cela n'est nullement nécessaire, et le premier courant peut être plus ou moins élevé au-dessus du second.

On vérifie expérimentalement ce phénomène de rotation à l'aide de l'appareil suivant. Autour du bassin de cuivre EF (fig. 481) s'enroule un fil conducteur dont les extrémités sont en communication avec les deux bornes métalliques *m* et *o*. Au centre du bassin s'élève la petite colonne en métal A terminée supérieurement par une coupe. Cette colonne est en communication avec la borne *n*; le bord du bassin communique lui-même avec *p*. Pour se servir de

l'appareil, on verse de l'eau acidulée dans le bassin, on place du mercure dans la coupe et on dispose au-dessus d'elle, en le faisant reposer par une pointe, le petit équipage mobile BC. Celui-ci est

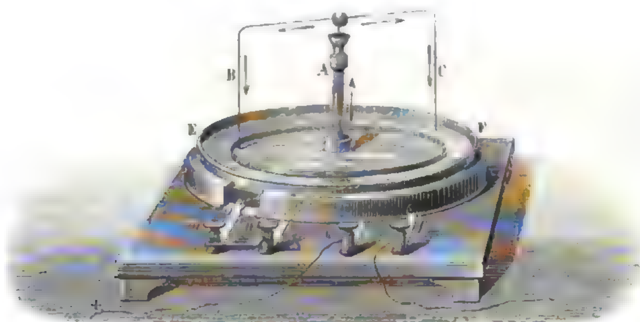


Fig. 481. — Rotation d'un courant fini par l'action d'un courant circulaire.

formé de deux branches horizontales qui se recourbent verticalement et viennent se fixer à un anneau plongeant dans l'eau acidulée.

Cela posé, supposons que l'on fasse communiquer directement *m* et *n*, et qu'on fixe en *o* et *p* les rhéophores positif et négatif d'une pile. Le courant, arrivant par *o*, suivra le conducteur circulaire, arrivera en *m* et de là en *n*, s'élèvera dans la colonne centrale comme l'indiquent les flèches, descendra par les fils verticaux B et C, passera dans l'eau acidulée et sortira en *p*. Or, dès que les communications seront établies, on verra l'équipage tourner dans le sens prévu par la théorie, c'est-à-dire en sens contraire du courant circulaire. Si, plaçant le rhéophore positif en *p*, on faisait entrer le courant par l'eau acidulée et qu'on fît communiquer directement *n* et *o*, le courant, arrivant par le conducteur BC, irait dans la branche horizontale de la circonférence au centre, et comme par la colonne centrale il passerait en *n* et ensuite en *o*, son sens resterait le même dans le courant circulaire; on voit dans ce cas le conducteur mobile prendre un mouvement de rotation contraire du précédent.

554. Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant fini mobile autour de son extrémité. — Un courant fini mobile autour de son extrémité peut éprouver aussi un mouvement de

rotation sous l'action d'un courant rectiligne indéfini ; c'est ce que montre clairement la figure 482. En effet, le courant OA, dirigé du centre à la circonférence et soumis à l'action du courant indéfini MN, est d'abord attiré en OA′ ; dans cette nouvelle position il est repoussé par *n*N et attiré par *mn*; il viendra donc successivement en OA″, OA‴, OA^{IV}. Dans cette position particulière, où les courants agissants sont parallèles et dirigés en sens contraire, il y a répulsion, le courant est poussé dans les positions OA^{V}, OA^{VI}, OA^{VII}, d'où il revient à la position initiale OA. Il y a donc rotation continue, et on voit que si, par exemple, le courant MN est dirigé de l'est à l'ouest, la rotation est dirigée de l'ouest à l'est, en passant par le sud. Si le courant mobile était dirigé en sens inverse, c'est-à-dire de A vers O, la rotation aurait lieu évidemment de l'ouest à l'est, en passant par le nord.

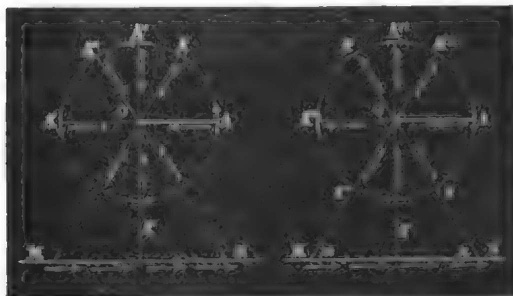


Fig. 482.

555. Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant fini perpendiculaire à sa direction. — Soit AB (fig. 483) un courant fini, descendant, situé au-dessus et derrière le courant indéfini MN ; abaissons une perpendiculaire DC commune aux deux courants et considérons deux éléments *p* et *p′*, situés de part et d'autre du point C et à égale distance. L'action de *p′* sur le point *m* du courant est répulsive et dirigée suivant *mf*, l'action de *p* est attractive et dirigée suivant *mf′* ; ces deux actions sont égales et la symétrie de la figure indique que

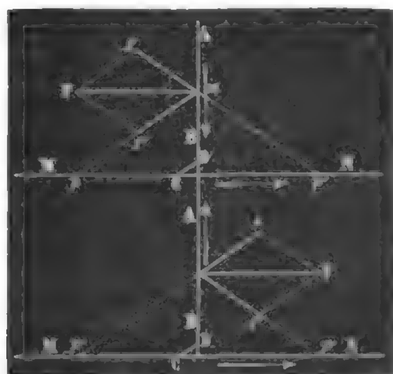


Fig. 483.

la résultante mF est parallèle à MN. Ce raisonnement s'appliquant à tous les points des deux courants, il s'ensuit que le courant fini se mouvra parallèlement à lui-même et au courant MN. Dans le cas où le courant fini est descendant, le mouvement est contraire à celui du courant indéfini; il serait évidemment de même sens dans le cas du courant ascendant. Les deux cas sont représentés dans la figure.

556. Action d'un courant rectiligne indéfini sur un courant rectangulaire mobile autour d'un axe perpendiculaire à sa direction. — Il résulte de ce qui précède que si un courant fini AB, perpendiculaire à la direction d'un courant indéfini (fig. 484), est mobile autour d'un axe OO′ parallèle à lui-même, le plan ABOO′ viendra se placer parallèlement au courant indéfini, de façon que AB soit en avant de OO′ dans le cas du courant ascendant et en arrière dans le cas contraire.

Si un système de deux courants parallèles AB, A′B′, mobile autour de l'axe OO′, est soumis à l'action du courant indéfini, les actions s'accorderont pour placer le système dans la position indiquée par la figure. Si les deux courants AB, A′B′ étaient tous les deux ascendants ou tous les deux descendants, la résultante des actions du courant indéfini serait évidemment nulle.

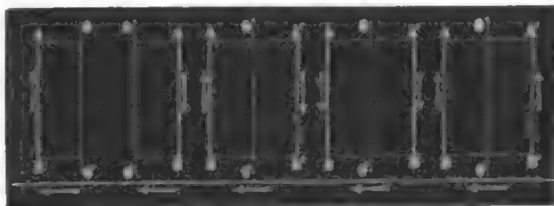


Fig. 484.

557. Action d'un conducteur rectiligne indéfini sur un courant rectangulaire mobile autour d'un axe perpendiculaire à sa direction. — Considérons actuellement (fig. 485) l'action du courant rectiligne indéfini sur un courant rectangulaire placé en arrière au-dessus de lui et mobile autour de l'axe oo'. L'effet sur les parties horizontales est évidemment nul, car il est de sens contraire sur les deux moitiés. Quant à la partie verticale descendante, elle doit se placer parallè-

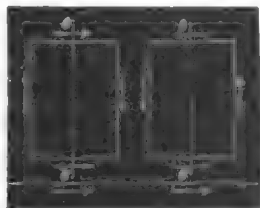


Fig. 485.

lement au courant indéfini en avant de *oo'*, et la partie ascendante doit se placer en arrière : le rectangle tout entier doit donc s'orienter dans un plan parallèle au courant indéfini et de façon que dans la partie inférieure le courant aille dans le même sens.

Il est très-aisé de comprendre que les raisonnements précédents s'appliquent au cas d'un courant circulaire et même d'un courant fermé quelconque, mobile autour d'un axe de symétrie. On est donc conduit à cette conclusion importante, qu'un courant de ce genre soumis à l'action d'un courant rectiligne indéfini se place parallèlement à ce dernier et de façon que dans la partie inférieure les courants aillent dans le même sens.

On vérifie expérimentalement les deux premiers résultats du § 556 à l'aide de l'appareil représenté par la figure 486. Il se compose de deux cuvettes CC, DD, la première étant supportée par la colonne métallique verticale AB ; une substance isolante empêche le contact de la colonne et des cuvettes ; un fil métallique *mno* se recourbe de manière que ses deux extrémités arrivent dans l'intérieur de chacune des cuvettes ; il est porté d'ailleurs par une tige munie d'un contre-poids K et forme ainsi un équipage mobile autour de la pointe B reposant sur la petite coupe qui termine la colonne. Celle-ci communique, d'une part, avec la cuvette supérieure à l'aide de la pièce *d*, et de l'autre avec la borne *f*.

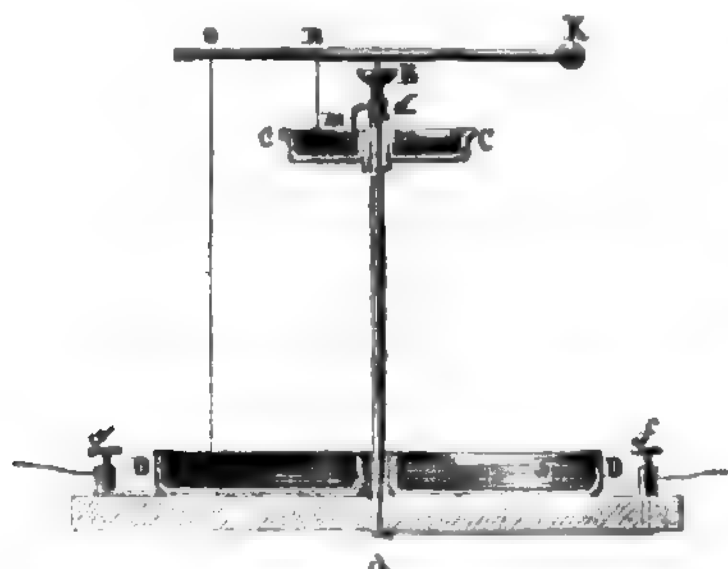


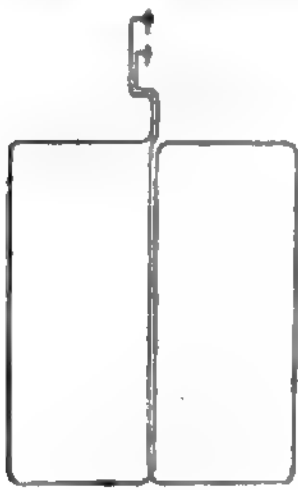
Fig. 486. — Orientation d'un courant vertical.

Quant à la cuvette inférieure, elle est en communication avec la borne *g*. On voit que si un courant arrive par *g*, il fournira une portion finie verticale et ascendante ; on aurait un courant descendant en le faisant entrer par *f*. On peut donc faire agir sur le système mobile un courant rectiligne placé dans son voisinage, et l'on reconnaît ainsi l'exactitude des conclusions précédentes.

558. Courants sinueux. — Un courant sinueux qui ne s'éloigne

que très-peu d'un courant rectiligne agit avec la même intensité que ce dernier et peut lui être substitué dans toutes les circonstances. On démontre ce fait en approchant d'un conducteur mobile un autre conducteur fixe formé d'un double fil replié sur lui-même (fig. 487), dont l'une des parties est rectiligne tandis que l'autre présente des sinuosités. Le courant parcourt les deux portions du fil en sens contraire, et l'on reconnaît que dans aucun cas le conducteur mobile n'est influencé; c'est que les deux courants agissants ont des intensités égales et contraires.

Ce n'est pas seulement à un courant rectiligne, mais bien à un





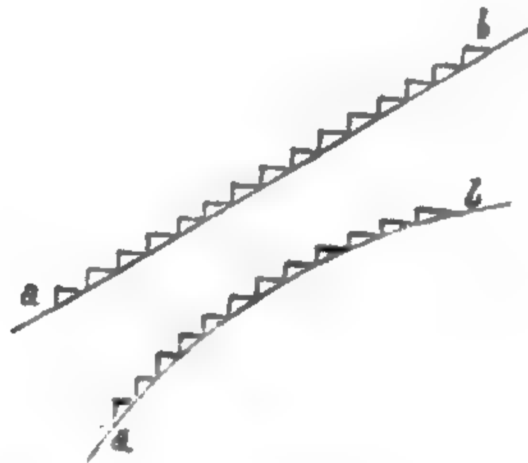


Fig. 487. Courants sinueux. Fig. 488.

courant de forme quelconque, que s'applique la propriété dont il s'agit; elle est d'ailleurs le fondement de la théorie mathématique de l'électro-dynamique. On conçoit en effet que les conducteurs de forme quelconque (fig. 488) pourront être décomposés en une série de petits éléments rectilignes, dont l'action mutuelle pourra être étudiée plus facilement et conduire à la connaissance de l'action totale.

559. Action mutuelle de deux éléments de courants. — La loi des courants sinueux permet en particulier de substituer à une petite portion de courant un polygone passant par ses extrémités ou ses projections sur des axes parallèles aux côtés du polygone. En se fondant sur ce principe, Ampère a calculé l'action mutuelle de deux éléments de courants dirigés d'une manière quelconque dans l'espace. Cette action est représentée par la formule suivante :

$$f = \frac{ii'\,ll'}{r^2}\left(\sin\alpha\sin\alpha'\cos\theta - \frac{1}{2}\cos\alpha\cos\alpha'\right).$$

Dans cette formule l et l' sont les longueurs des deux éléments, r leur distance, α et α' les angles que font leurs directions avec la droite qui joint leurs milieux, θ l'angle que font entre eux les deux plans menés par cette droite et par chaque élément, enfin i et i' sont deux constantes dépendant de l'intensité propre des courants. Cette action élémentaire étant connue, on pourra, par les procédés ordinaires de l'analyse, résoudre les diverses questions qui peuvent se présenter dans l'action des courants finis. Toutefois cette formule est assez compliquée, et pour résoudre les difficultés que présente son application, Ampère a fait preuve d'un génie mathématique presque aussi digne d'être admiré que l'est la puissance d'invention à laquelle est due l'électro-dynamique.

560. Action de la terre sur les courants. — Les courants électriques mobiles peuvent, quand ils sont abandonnés à eux-mêmes, exécuter certains mouvements qui sont dus à l'action de la terre. Ainsi, si dans l'appareil représenté par la figure 486 on fait circuler un courant qui soit ascendant dans la branche verticale, on verra celle-ci se porter à l'ouest et s'y fixer dans une position d'équilibre stable; elle se porterait à l'est si le courant était descendant.

Ce mouvement est sans doute un cas particulier de l'action mutuelle des aimants et des courants, puisque l'aimant terrestre doit agir à la façon d'un aimant ordinaire. Mais il peut aussi être expliqué par l'existence d'un courant terrestre (fig. 489) qui serait dirigé de l'est à l'ouest et situé sous l'horizon. Cette hypothèse a sur la première l'avantage de rattacher le phénomène en question à des phénomènes de même nature, et de dévoiler dans un cas particulier la connexion intime du magnétisme et de l'électricité. On voit, en effet, que l'aimant terrestre peut être remplacé par un courant électrique perpendiculaire au méridien magnétique, placé sous l'horizon et dirigé de l'est à l'ouest.

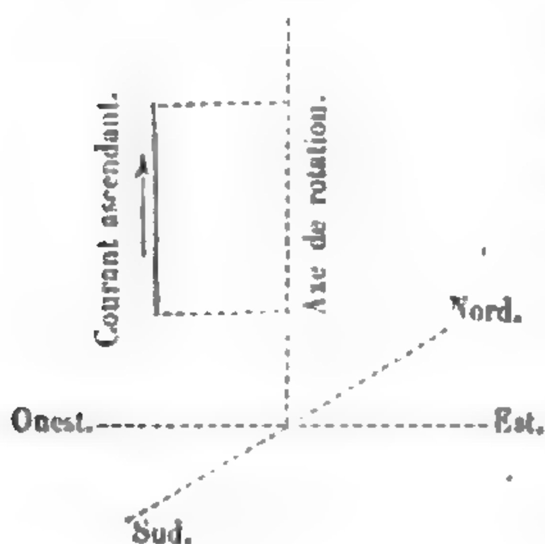


Fig. 489.

L'expérience précédente nous fait connaître la direction du courant terrestre, mais non point sa position. Il pourrait en effet se

trouver au nord, au sud, ou même sous nos appareils, que l'effet observé serait le même. Mais nous avons un moyen de faire cesser cette incertitude; servons-nous à cet effet de l'appareil décrit au § 553, en faisant passer le courant seulement dans l'équipage mobile; si le courant entre dans la branche horizontale de la circonférence au centre, on la verra, sous l'action de la terre, se mouvoir de l'ouest à l'est en passant par le nord; la rotation a lieu de l'ouest à l'est en passant par le sud si le courant mobile va du centre à la circonférence.

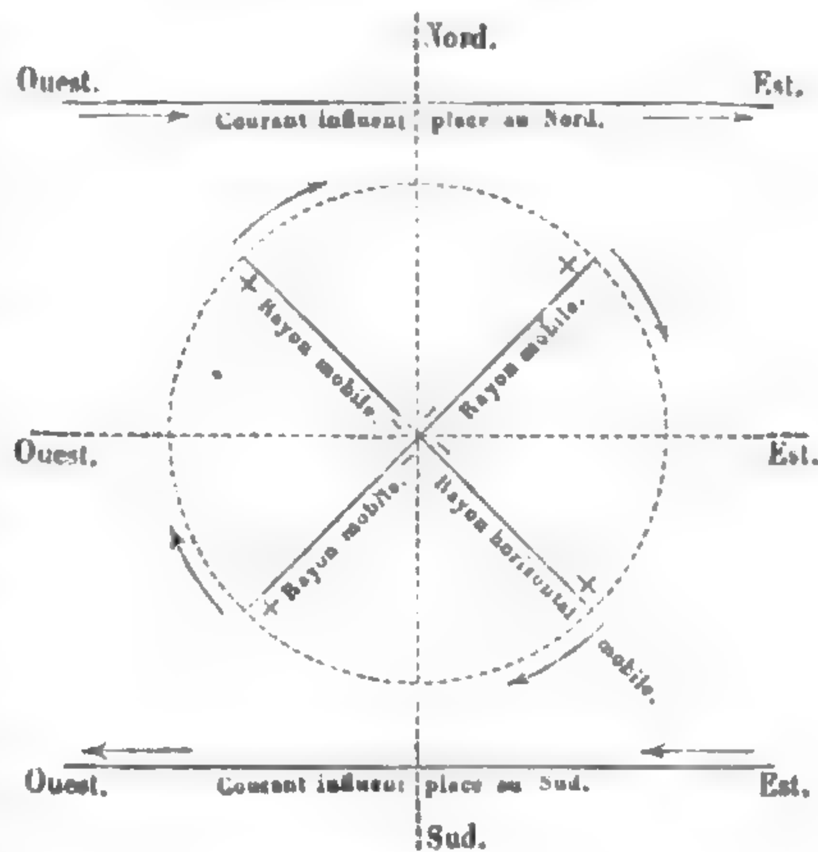


Fig. 490.

Ce phénomène peut s'expliquer ou par un courant de l'est à l'ouest situé au sud, ou par un courant de l'ouest à l'est placé au nord; mais cette dernière hypothèse est inadmissible puisque la direction est déjà accusée d'une façon certaine.

L'action électro-dynamique du globe terrestre peut donc être représentée par celle d'un courant situé au sud de l'Europe, circulant dans l'intérieur du globe de l'est à l'ouest. Comme on peut imaginer des expériences analogues dans les différents points du globe, on voit que c'est un courant fermé situé vers l'équateur et dont le plan ne diffère pas beaucoup de celui de l'équateur magnétique. Nous ferons d'ailleurs à ce sujet une remarque analogue à celle que nous avons faite à propos de l'aimant terrestre. Le courant terrestre équatorial ne doit pas être considéré comme une réalité physique, il représente seulement la résultante des actions des différents courants qui, par suite de causes diverses et particulièrement des variations de température, sillonnent incessamment l'intérieur de notre globe.

561. Solénoïdes. — Le courant terrestre explique naturellement la direction de l'aiguille aimantée; c'est un cas particulier de

l'expérience d'Œrstedt. Mais l'aiguille aimantée elle-même peut être remplacée par un organe électrique; c'est là sans contredit la plus belle découverte d'Ampère, la conception la plus remarquable peut-être que nous offre l'histoire des sciences.

Suspendons en effet à l'appareil à colonnes (fig. 473) un courant rectangulaire ou circulaire, celui-ci s'orientera dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, de façon que dans la partie inférieure le courant aille de l'est à l'ouest. Si donc nous imaginons une série de courants circulaires fermés de même sens et placés perpendiculairement à une droite, cette droite, c'est-à-dire l'axe du système, devra se diriger comme une aiguille aimantée; ce système a été appelé par Ampère un *solénoïde*. La réalisation de cette idée présente au premier abord d'insurmontables difficultés, car comment se procurer cette série de courants fermés individuels qui constituent le solénoïde? Ces difficultés ont été résolues de la façon la plus heureuse.

Concevons en effet qu'on contourne un fil métallique (fig. 491) de façon à former des cercles unis les uns aux autres par une portion rectiligne, ce système ne différera du solénoïde que par les portions rectilignes; mais si on replie le fil aux extrémités et qu'on le ramène au milieu, comme le montrent les figures A et B, le courant qui traversera cette portion rectiligne sera de sens contraire à celui qui parcourt la portion rectiligne qui réunit les cercles; elle en détruira donc l'effet et le système sera équivalent à un véritable solénoïde.

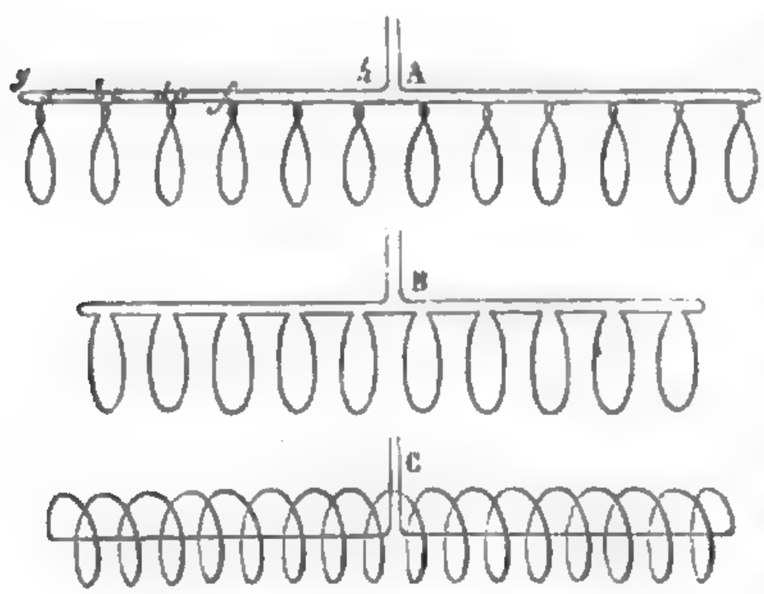


Fig. 491. — Solénoïdes.

Au lieu de cette disposition on peut évidemment, en se fondant sur la loi des courants sinueux, adopter celle beaucoup plus commode que représente la figure C. Le fil s'enroule en hélice, chacune des spires représente ainsi le cercle fermé, plus une portion rectiligne égale au pas, et le retour du fil détruit l'effet de cette portion rectiligne.

On peut donc réaliser un solénoïde; si on le suspend à l'appareil à colonnes (fig. 492) et qu'on lance le courant, on le voit immédiatement se diriger et se placer parallèlement à une aiguille aimantée de déclinaison. Les extrémités du solénoïde portent les mêmes noms que les pôles correspondants de l'aimant. Ces extrémités sont d'ailleurs faciles à distinguer l'une de l'autre; le courant allant en effet dans la partie inférieure de l'est à l'ouest, si on regarde en face le pôle austral, on aura la partie ascendante à droite; ce sera le contraire pour le pôle boréal. La figure 493 montre les pôles austral A et boréal B d'un solénoïde, tels que l'observateur les aperçoit en les regardant de face. Cette disposition s'aperçoit aussi dans la figure 492.

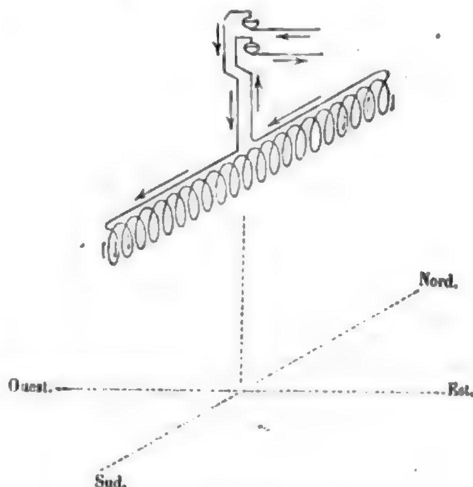
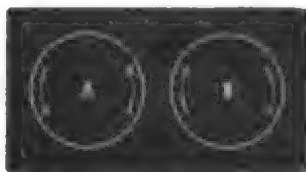


Fig. 492. — Orientation du solénoïde.


Fig. 493. — Pôles d'un solénoïde.

562. Inclinaison du solénoïde. — Si l'on pouvait se servir d'un solénoïde entièrement libre de se mouvoir autour de son centre de gravité, on le verrait se placer parallèlement à l'aiguille d'inclinaison. Cette expérience est à peu près irréalisable avec un solénoïde proprement dit à cause de son poids, mais on peut la faire avec un de ses éléments, et le caractère démonstratif en est exactement le même. On se sert, comme le représente la figure 494, d'un rectangle mobile autour d'un axe passant par son centre et perpendiculaire au méridien magnétique. Dès que le courant est lancé dans son intérieur il se dispose dans un plan incliné à l'horizon, et l'on reconnaît

qu'il fait avec celui-ci un angle égal à l'inclinaison magnétique.

Cette expérience nous fait connaître la direction du plan du courant terrestre, qui est bien, comme nous l'avons dit, celui de l'équateur magnétique. Il est évident d'ailleurs, d'après elle, qu'un solénoïde libre se placerait parallèlement à l'aiguille d'inclinaison. Donc, au point de vue de l'action terrestre, l'aiguille aimantée peut être exactement remplacée par un solénoïde. On voit d'ailleurs que dans la position d'équilibre deux des côtés du rectangle sont parallèles au courant terrestre et deux autres sont perpendiculaires. Ces derniers éprouvent des actions dont la résultante est nulle. Quant aux premiers, l'un est attiré, l'autre repoussé, et l'équilibre n'a lieu que lorsque le plan du cadre mobile renferme les deux forces.

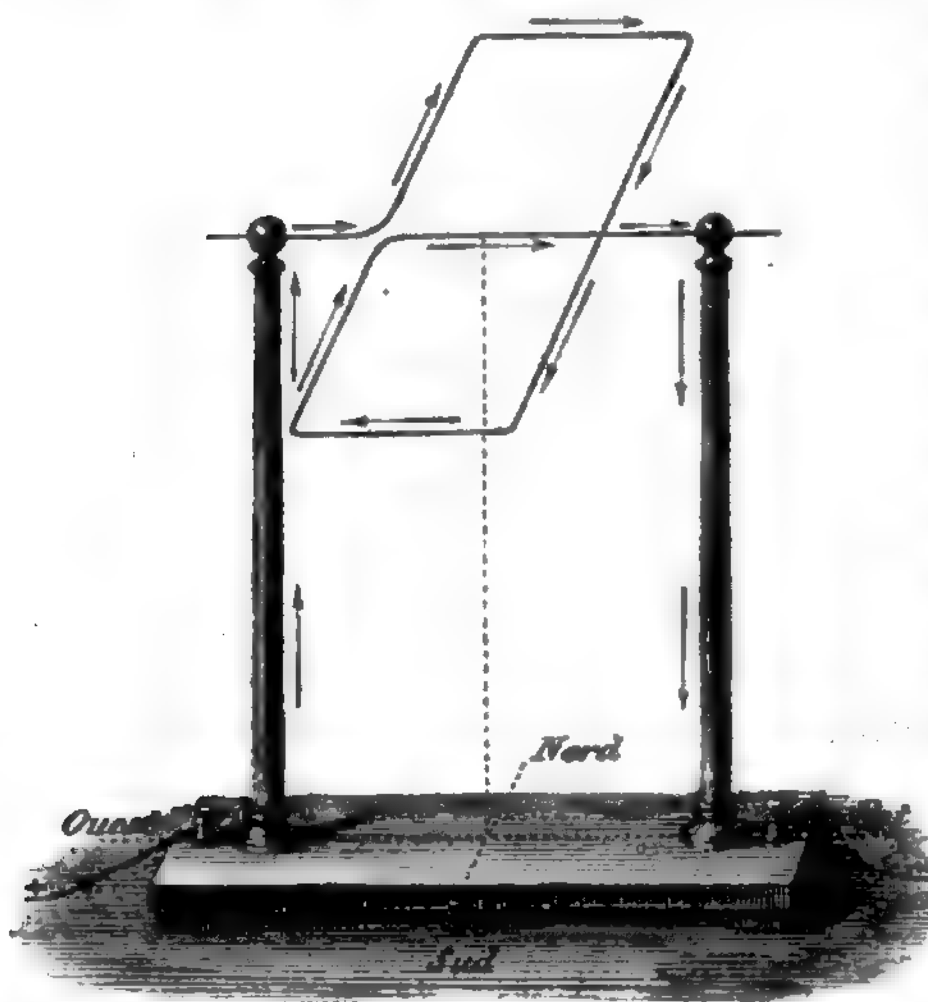


Fig. 494. — Inclinaison d'un élément de solénoide.

563. Actions mutuelles des solénoïdes et des aimants. — Les solénoïdes et les aimants ne s'équivalent pas seulement au point de vue de l'action terrestre, ils s'équivalent aussi au point de vue de leurs actions mutuelles. Ainsi les pôles de même nom des solénoïdes se repoussent et les pôles de nom contraire s'attirent, ainsi qu'on peut le vérifier en suspendant à l'appareil à colonnes un solénoïde mobile et approchant de ses extrémités celles d'un solénoïde fixe.

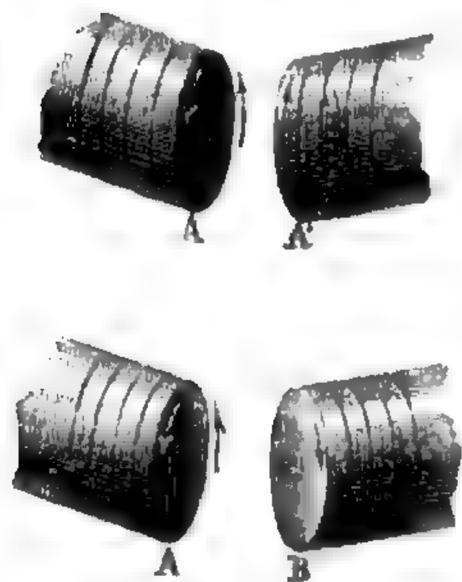


Fig. 495. — Actions mutuelles des solénoïdes.

Ce phénomène d'attraction et de répulsion est d'ailleurs facile à comprendre directement. Plaçons en effet en regard l'un de

l'autre les deux pôles australs d'un solénoïde (fig. 495); de quelque façon qu'on s'y prenne, ce seront toujours des courants de sens contraire qui seront en présence l'un de l'autre, il y aura donc répulsion. Si les pôles en regard sont de nom contraire, les courants agissant l'un sur l'autre ont le même sens et il y a attraction.

Si enfin on approche des extrémités d'un solénoïde les pôles d'un aimant (fig. 496), il y a une action réciproque identique à celle de deux aimants : attraction ou répulsion suivant que les extrémités sont de même nom ou de nom contraire. Le calcul va d'ailleurs au delà des expériences qui viennent d'être décrites. Si, en effet, à l'aide de la formule qui représente l'action des deux éléments de courant, on calcule l'action mutuelle de deux solénoïdes, on trouve que cette action se réduit à quatre forces, deux attractives et deux répulsives émanant des extrémités et variant en raison inverse du carré de la distance. Le solénoïde se comporte donc absolument comme une aiguille aimantée, il en est une représentation merveilleusement exacte. « Jusqu'à cette invention d'Ampère, nul n'avait pu imiter l'aimant; depuis elle, il n'en a pas été trouvé d'autre image[1]. »

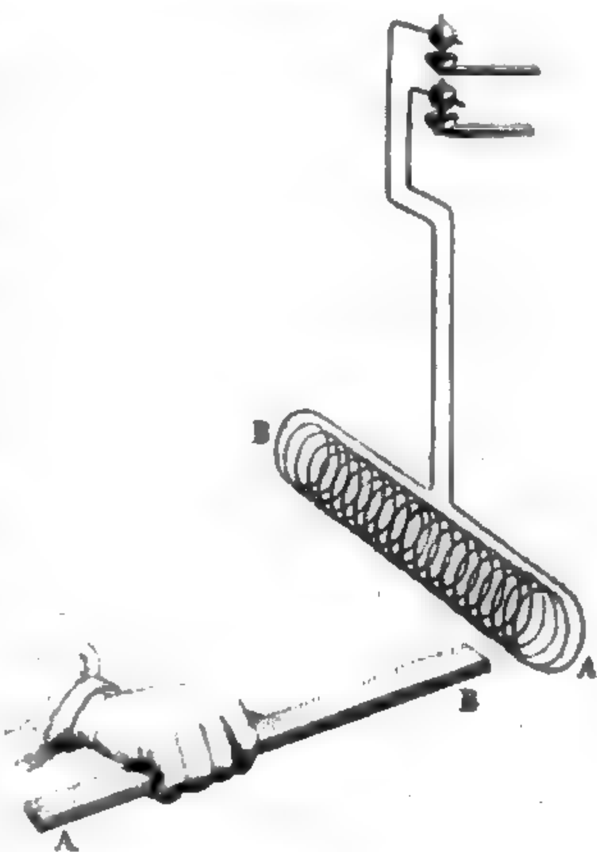


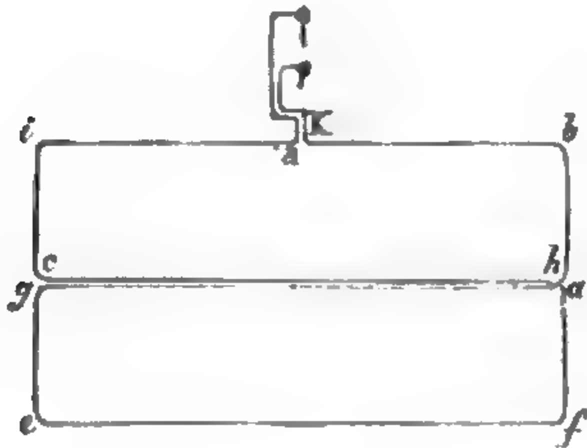
Fig. 496. — Actions réciproques des aimants et des solénoïdes.

Ajoutons enfin que l'expérience fondamentale d'Œrstedt est une conséquence de l'action d'un courant sur un solénoïde.

564. Équipages astatiques. — L'influence de la terre sur les courants peut donner lieu à quelques perturbations dans l'observation des phénomènes électro-dynamiques. On en élude l'influence en se servant d'équipages astatiques semblables à ceux que représentent les figures 497 et 498. On voit que le conducteur mobile

1. Quet, *Rapport sur l'Électricité et le Magnétisme*, p. 12.

a b c d e f g h est dans les deux cas formé de deux moitiés qui devraient s'orienter d'une façon inverse sous l'action du globe. Celle-ci est



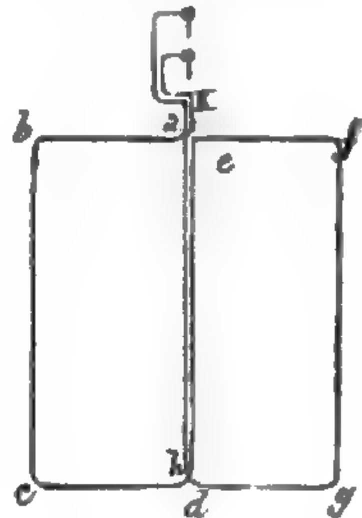
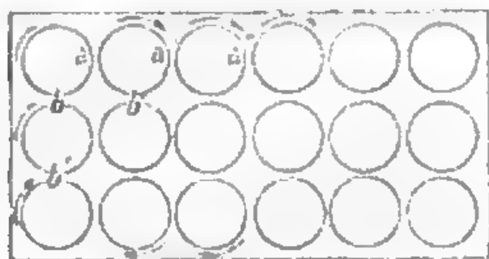


Fig. 497. Conducteurs astatiques. Fig. 498.

donc sans effet, et l'on peut étudier sans cause d'erreur, de ce chef du moins, les actions électro-dynamiques sur les branches verticales ou horizontales des conducteurs ainsi disposés.

565. Théorie du magnétisme. — En se fondant sur les faits précédents, Ampère a supposé que ce que l'on appelle magnétisme est le résultat de courants électriques fermés existant dans les particules mêmes des corps magnétiques. Dans les corps magnétiques, mais non aimantés, les courants sont orientés d'une manière quelconque, tandis que dans les aimants ils sont tous dirigés dans le même sens. Dans une section transversale, par exemple, les courants affectent la disposition indiquée par la figure 499. Or dans l'intérieur du corps les courants particuliers se trouvent en présence de tous les côtés avec



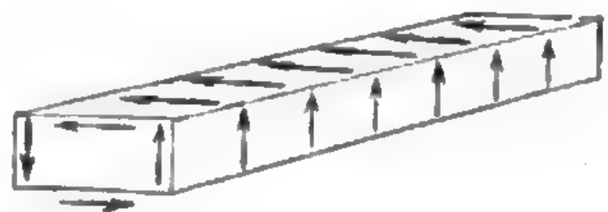


Fig. 499. Courants particulaires. Fig. 500.

des courants contraires, de sorte que les choses se passent comme s'il y avait un courant unique extérieur, comme le montre la figure 500. Dans un corps magnétique, sous l'influence d'un aimant déjà formé, les courants s'orientent par suite de la tendance qu'ils ont toujours à se placer parallèlement les uns aux autres. S'il existe dans le corps magnétique ce qu'on appelle la *force coercitive*, l'orientation persiste après que l'influence qui l'a produite a cessé ;

si c'est au contraire du fer doux ou cette force n'existe pas, les courants reprennent après l'influence toutes les directions possibles, de sorte que l'action au dehors est nulle.

La théorie d'Ampère est un des plus grands pas que l'on puisse signaler vers l'objectif que ne cesse de poursuivre la science, c'est-à-dire la réduction à l'unité des agents physiques. Elle fait disparaître en effet le magnétisme comme phénomène indépendant. Elle permet d'ailleurs d'expliquer de la façon la plus simple tous les phénomènes de l'électro-magnétisme. Nous nous bornerons ici a en citer un exemple.

566. Expérience d'Ampère. — Un aimant lesté avec du platine flotte verticalement dans le mercure que contient une éprouvette.

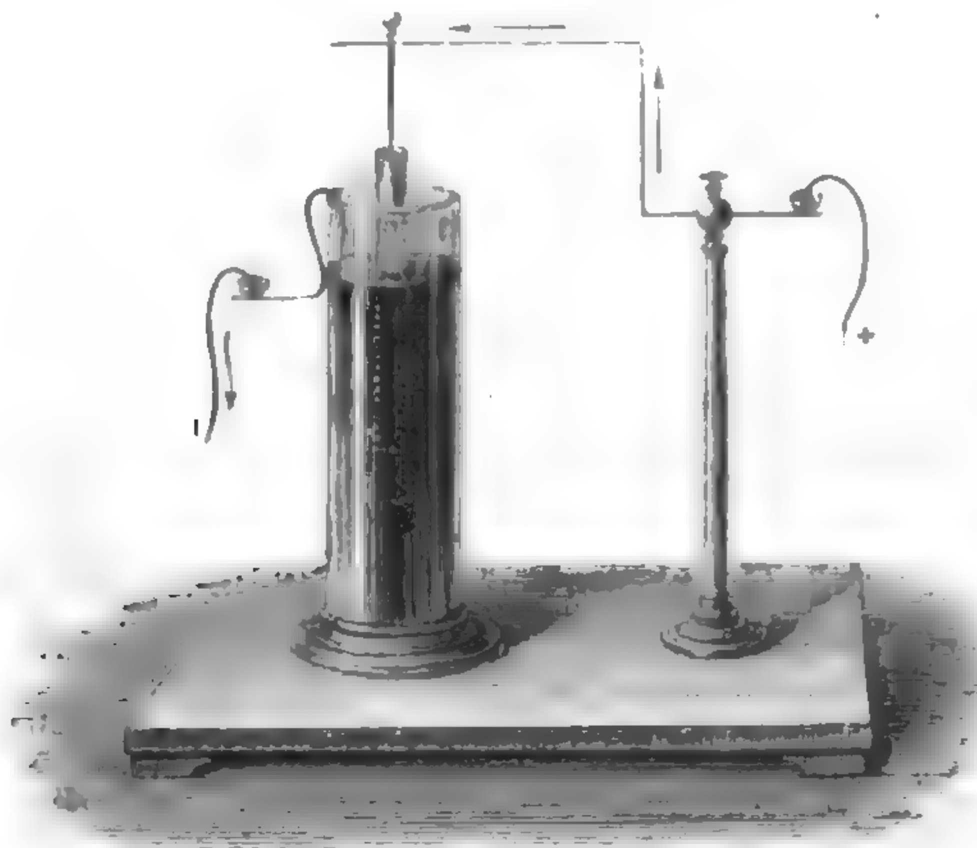


Fig. 501. — Expérience d'Ampère.

Au-dessus de l'aimant est disposée une pointe que l'on fait descendre jusque dans une petite cavité que l'aimant présente à sa partie supérieure et dans laquelle on met une petite quantité de mercure; de cette façon l'aimant est maintenu au milieu de l'éprouvette. Cela posé, on met les rhéophores d'une pile en communication l'un avec la pointe et l'autre avec le mercure ; un courant circule dans l'appareil et l'aimant fait partie lui-même du circuit. Or on voit immédiatement l'aimant tourner. Si c'est le pôle austral qui occupe la partie supérieure et que le courant arrive par la pointe, la rotation a lieu de l'est à l'ouest en passant par le nord.

Rien de plus simple que l'explication de ce phénomène. Le courant arrivant par le centre de l'aimant (fig. 502) rayonne dans diverses directions, par exemple suivant ACD. La portion du courant qui traverse l'aimant ne saurait produire aucune action sur l'aimant lui-même puisqu'elle est détruite par une réaction égale et contraire. Quant à la partie CD, elle repousse la partie voisine C*m* du courant constitutif de l'aimant et attire C*n*. Le même effet se produit sur les différents points de la surface de l'aimant, ce qui produit la rotation de celui-ci dans le sens indiqué plus haut. En effet, si CD est la direction du nord, par exemple, l'est se trouve du côté de *n*, et

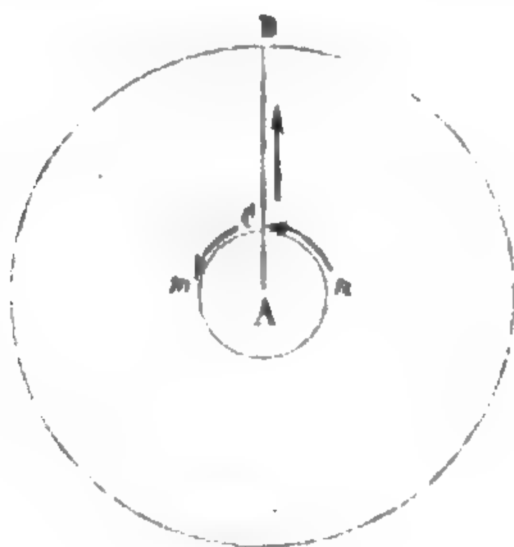


Fig. 502.

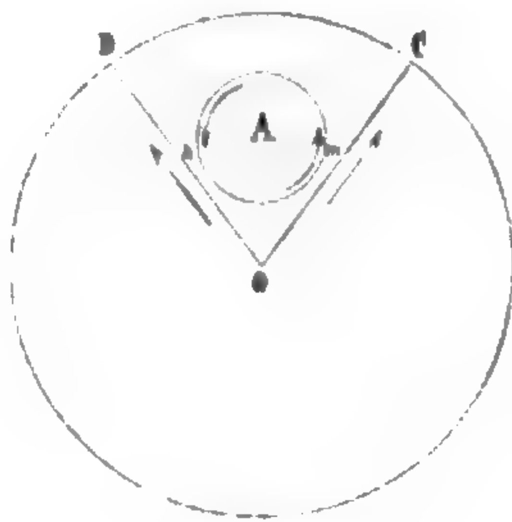


Fig. 503.

l'ouest du côté de *m*. On expliquerait avec la même facilité le sens de la rotation dans les autres cas que celui que nous avons choisi.

On donne quelquefois à l'expérience une forme différente. On fait descendre la pointe jusque dans l'intérieur du mercure et on laisse flotter l'aimant en dehors du centre. Dès que le courant passe, l'aimant se met à tourner autour de la pointe. Dans le cas où c'est par celle-ci que le courant entre, la rotation se fait de l'ouest à l'est en passant par le nord. En effet, les courants OD et OC (fig. 503), par leur action sur les parties les plus voisines *n* et *m* de l'aimant, tendent, le premier à le repousser, le second à l'attirer; il sera donc poussé vers OC, et comme dans toutes les situations les conditions sont les mêmes, il tournera dans le sens DC qui est bien le sens indiqué plus haut.

567. Aimantation par les courants. — La théorie d'Ampère conduit à cette conséquence inévitable que les courants doivent produire l'aimantation, puisqu'il ne s'agit que de déterminer une

certaine orientation des courants particulaires. Arago avait le premier constaté le fait, mais sans pouvoir préciser nettement les conditions de succès dans cette opération et la nature des pôles obtenus. Ampère eut l'idée d'introduire l'aiguille d'acier dans un solénoïde, et le résultat fut conforme à ses prévisions, c'est-à-dire que l'aiguille intérieure se trouve avoir des pôles semblables à ceux de l'hélice magnétisante. Cela est en effet tout naturel, puisque les courants circulaires de l'hélice ont dû orienter parallèlement à eux-mêmes ceux qui existent dans les particules de l'acier.

Il faut remarquer que dans cette opération les parties rectilignes du courant ne sauraient avoir aucun effet; aussi s'est-on arrêté à la disposition qui consiste à placer l'aiguille dans un tube de verre, par exemple, et à enrouler simplement en hélice autour du tube le fil métallique qui doit être traversé par le courant. Toutes les parties de l'hélice agissent évidemment dans le même sens et le pôle austral de l'aiguille aimantée se trouve toujours à la gauche du courant.

On peut employer deux sortes d'hélices : l'hélice dextrorsum (1, fig. 504), dans laquelle l'enroulement se fait de gauche à droite,

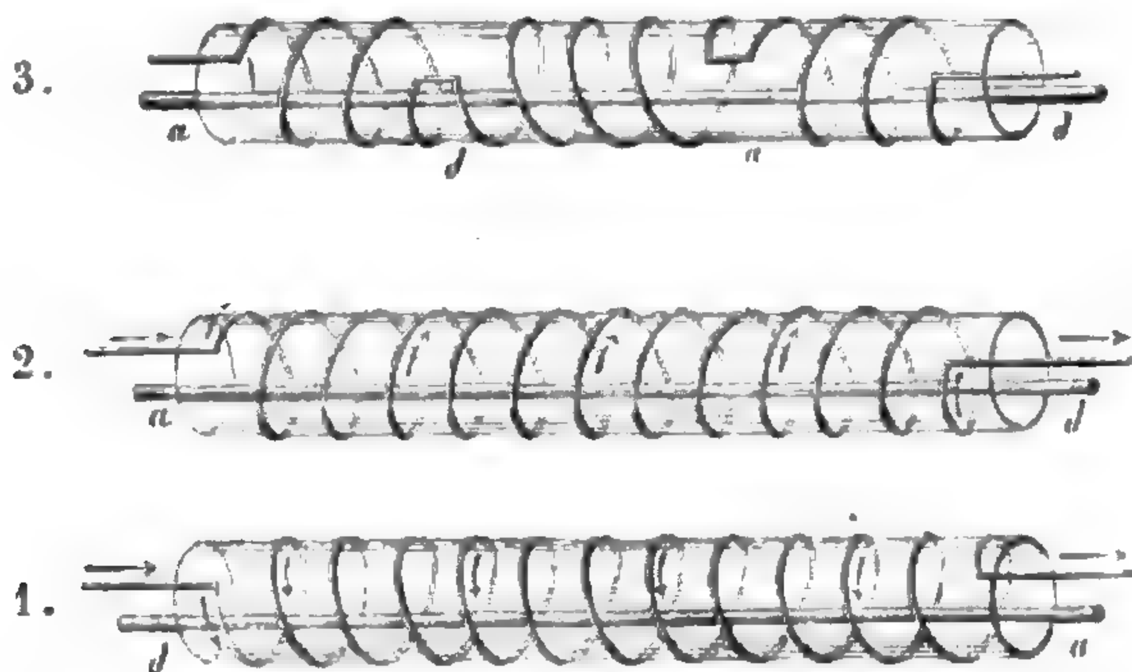


Fig. 504. — 1, Hélice dextrorsum. — 2, Hélice sinistrorsum. — 3, Hélice à enroulement dans plusieurs sens.

et l'hélice sinistrorsum (2, fig. 504), dans laquelle l'enroulement a lieu de droite à gauche. Dans le premier cas, le pôle austral *a* se trouve à l'extrémité par laquelle le courant sort; dans le second cas, le pôle austral se trouve à l'extrémité par laquelle le courant entre.

Si on enroule le fil alternativement dans un sens et dans l'autre (3, fig. 504), l'aiguille présentera autant de points conséquents qu'il y a de changements dans le sens de l'involution.

568. Électro-aimants. — C'est aussi à Arago que l'on doit la première observation de l'action d'un courant sur le fer doux. Ayant eu l'idée de plonger dans la limaille de fer un fil métallique traversé par un très-fort courant, il reconnut que les grains de limaille restaient adhérents au fil, qu'ils se mettaient en croix avec lui et qu'ils retombaient dès que le courant cessait de passer; chacun des grains de limaille devient évidemment dans cette expérience un petit aimant qui se place en croix avec le courant. On obtient une aimantation énergique d'un cylindre de fer en enroulant autour de lui un grand nombre de tours d'un fil métallique recouvert de soie ou de toute autre matière isolante, et en y faisant circuler un courant. L'absence de force coercitive rend le développement du magnétisme beaucoup plus énergique, et l'on peut obtenir ainsi des aimants artificiels d'une très-grande puissance; c'est ce qu'on appelle des *électro-aimants.*

On donne assez souvent aux électro-aimants la forme d'un fer à cheval (fig. 505); l'enroulement du fil est dans ce cas de sens contraire sur les deux branches, de telle façon que si l'on suppose le barreau redressé, l'enroulement soit partout de même sens. Par cette disposition, on obtient toujours deux pôles contraires aux extrémités.

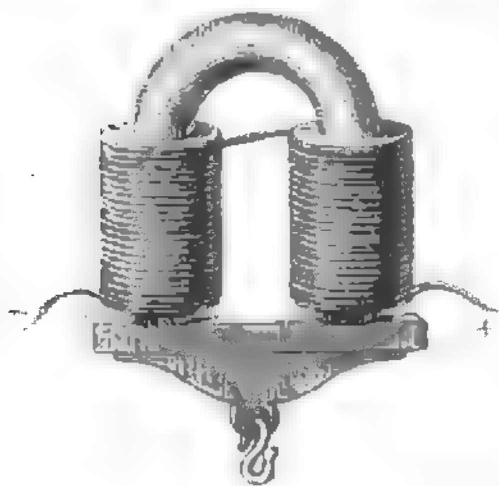


Fig. 505. — Électro-aimant en fer à cheval.

La force portative d'un électro-aimant peut croître, pour ainsi dire, indéfiniment, à mesure que l'on augmente et les dimensions du barreau et la longueur du fil et l'intensité du courant qui le traverse. On peut obtenir ainsi, par l'électricité, et de la façon la plus simple, des aimants d'une extrême puissance; aussi est-ce d'eux qu'on se sert aujourd'hui dans beaucoup de circonstances où on employait autrefois les aimants ordinaires. La figure 506 représente l'électro-aimant que M. Pouillet avait fait construire pour la Faculté des sciences; il peut porter une charge de plusieurs milliers de kilogrammes.

Ce n'est toutefois pas à leur puissance que les électro-aimants doivent surtout leur intérêt, c'est à la possibilité de les faire naître et de les détruire à volonté. Si, en effet, le courant cesse de passer dans le fil, l'aimantation cesse et les pièces qui étaient attirées peu-

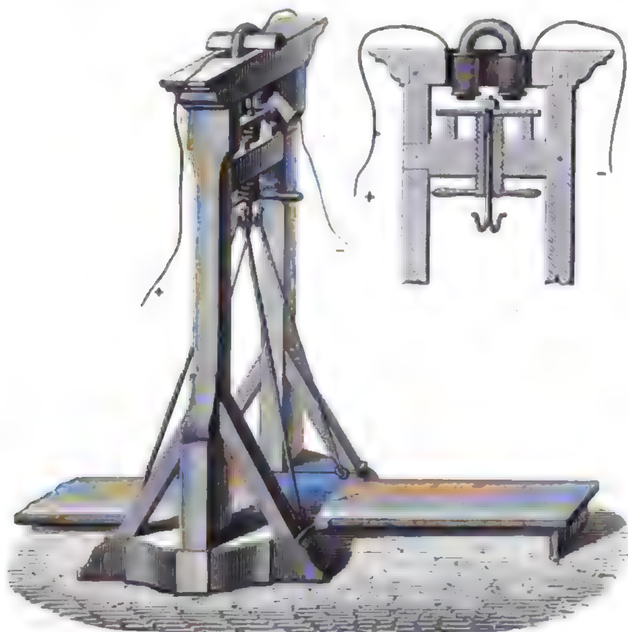


Fig. 506. — Électro-aimant de M. Pouillet.

vent reprendre leur position initiale. On peut ainsi, par l'introduction et la rupture successive du courant, obtenir des mouvements qui peuvent être utilisés de diverses façons et qui sont devenus en effet le principe d'applications importantes, dont quelques-unes seront décrites plus loin.

569. Magnétisme rémanent. — Au moment où le courant cesse de passer dans un électro-aimant, l'aimantation ne disparaît pas complétement, il en subsiste encore une partie, faible sans doute, mais qui peut être suffisante pour maintenir au contact les armatures; c'est ce que l'on appelle le *magnétisme rémanent*. On se met à l'abri des fâcheux effets qu'ils pourraient produire par l'emploi des *ressorts antagonistes*. Ce sont des ressorts qui rappellent à leur position initiale les pièces que le courant attire, au moment où

celui-ci cesse. Il est à remarquer d'ailleurs que lorsqu'on a détaché l'armature maintenue par le magnétisme rémanent, celui-ci disparaît presque complétement. La figure 507 représente un électro-

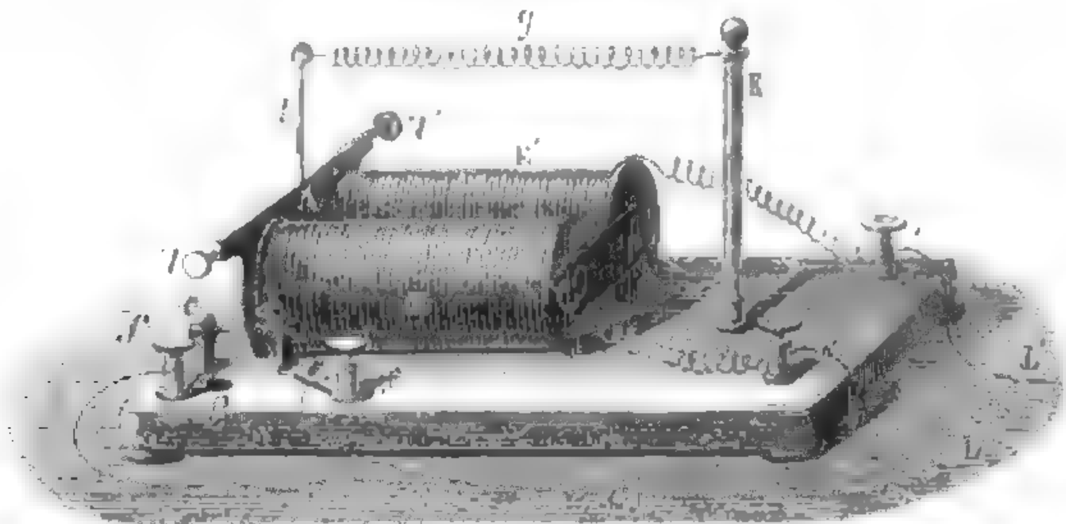


Fig. 507. — Électro-aimant muni d'un ressort antagoniste.

aimant EE' muni d'un ressort antagoniste *g*. L'armature A, fixée au levier *t*, est mobile autour de l'axe VV'. Le ressort antagoniste *g*, fixé par une de ses extrémités en K, s'attache par l'autre au sommet du levier *t*; il tend donc à ramener l'armature en arrière quand le courant cesse. On voit dans la même figure deux pointes *c* et *d* que l'on peut rapprocher plus ou moins de manière à limiter l'amplitude des mouvements de l'armature.

CHAPITRE XLIX.

EFFETS CALORIFIQUES PRODUITS PAR LES COURANTS.

570. Échauffement des fils métalliques par le passage du courant. — Nous avons vu dans le chapitre XLI que la décharge d'une forte jarre ou d'une batterie électrique à travers un fil métallique donne lieu à l'échauffement de celui-ci, qui peut rougir, fondre, brûler ou se volatiliser suivant les circonstances. Une décharge électrique est en définitive une sorte de courant, et il est naturel de supposer que celui-ci, circulant dans un fil conducteur, donne lieu à des phénomènes analogues. C'est ce que l'on a observé très-peu de temps après la découverte de la pile. Il n'est pas besoin pour cela d'un courant bien énergique; un seul élément de Wollaston de 1 décimètre carré de surface suffit pour fondre de minces fils de platine de quelques centimètres de longueur. C'est d'ailleurs bien plus à l'étendue des couples qu'à leur nombre, ainsi que cela a été dit (546), qu'est dû le succès dans les expériences de ce genre. Aujourd'hui avec 50 des grands éléments de Bunsen, qui sont d'un usage courant dans les cabinets de physique, on peut obtenir les effets les plus brillants.

Il est commode de se servir pour ces expériences de l'appareil suivant (fig. 508). Deux colonnes métalliques montées sur une table présentent à diverses hauteurs des couples de boutons conducteurs *aa'*, *bb'* entre lesquels on peut tendre les fils et les introduire dans le circuit de la pile. Afin que le courant ne traverse que le fil sur lequel on veut expérimenter, les boutons métalliques sont engagés dans des montures qui les isolent des colonnes.

Lorsqu'on fait passer un courant énergique dans un fil assez long qui a été primitivement bien tendu, on voit le fil s'allonger d'abord et former à cause de son poids une *chaînette* plus ou moins marquée. Puis il rougit, fond d'abord sur sa partie superficielle s'il est suffisamment gros, des globules liquides courent sur sa longueur, tombent sur le sol et s'enflamment si le métal est combustible. Si l'on attache à l'un des rhéophores une lime d'acier, celle-ci brûle en projetant une série de globules enflammés tout autour d'elle, ce qui donne lieu à une sorte de gerbe d'artifice très-brillante.

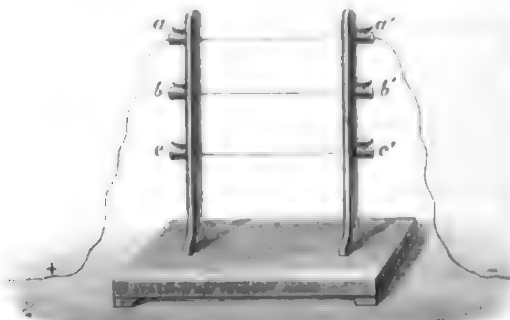


Fig. 508. — Support pour faire rougir les fils.

571. Loi de l'échauffement d'un fil homogène. — L'élévation de température que subit un fil traversé par un courant augmente, toutes choses égales d'ailleurs, avec la résistance opposée par ce fil au mouvement de l'électricité : ainsi elle est plus grande avec un fil de platine qu'avec un fil de cuivre, plus grande aussi avec un fil de faible section qu'avec un fil gros.

Lorsque les diverses parties du circuit ne sont pas homogènes et qu'il se rencontre comme des demi-solutions de continuité, il y a en ces points une résistance locale qui peut être considérable et qui amène une forte élévation de température. Ainsi, par exemple, si l'on prend le rhéophore négatif d'une pile de Bunsen et qu'on lui fasse toucher l'un des charbons, il se produit une vive lumière en même temps que l'extrémité du rhéophore peut rougir ou même être fondue. C'est une circonstance analogue qui donne lieu aux phénomènes de déflagration très-fréquents, que l'on observe entre les conducteurs qui se trouvent momentanément à une petite distance du mercure dans lequel ils doivent plonger, pour établir la continuité du circuit.

Dans le cas des conducteurs homogènes on a pu trouver la loi

très-simple de l'échauffement. Énoncée d'abord par Joule, elle a été vérifiée avec beaucoup de soin par MM. Éd. Becquerel et Lenz.

Lorsqu'un courant traverse un fil métallique homogène, la quantité de chaleur dégagée dans un temps donné est proportionnelle à la résistance du fil et au carré de l'intensité du courant.

Cette loi s'exprime par la formule

$$Q = Kri^2.$$

Q désigne la quantité de chaleur, r la résistance du fil, i l'intensité du courant, et K une constante.

On la démontre très-aisément en introduisant le fil contourné en spirale dans un petit calorimètre à eau ou à alcool; la médiocre conductibilité de ces deux liquides empêche l'électricité de passer directement d'une spire à l'autre.

Cette loi s'applique aussi à l'échauffement des liquides traversés par les courants, mais on doit tenir compte, dans son interprétation, de la quantité de chaleur qui intervient dans l'action électrolytique qui accompagne le passage du courant; enfin, suivant M. Joule, la loi est applicable aussi à la quantité de chaleur développée dans l'appareil rhéomoteur lui-même. On peut donc la considérer comme s'appliquant au courant complet produit dans un circuit en y comprenant la pile. D'après cela, désignons par Q la quantité totale de chaleur produite par une pile, par R la résistance totale, nous pourrons écrire la relation

$$Q = KRi^2.$$

Mais, d'après la loi de Ohm, $i = \frac{E}{R}$, ce qui donne, en substituant dans la formule précédente :

$$Q = K\frac{E^2}{R}.$$

D'autre part, pour une force électromotrice constante, la quantité M d'électricité qui passe dans l'unité de temps est inversement proportionnelle à la résistance (550), ce qu'exprime la formule $M = \frac{K'}{R}$, d'où $R = \frac{K'}{M}$. Substituons cette valeur de R, et désignons

par la constante unique A le quotient des deux quantités K et K', nous aurons

$$Q = A . E^2 M.$$

Cette valeur de Q, étant indépendante de la nature de la résistance du circuit, paraît indiquer que la chaleur totale produite par la pile est un phénomène purement électrique, et qu'il ne doit dépendre que de l'action chimique à laquelle l'électricité est due.

572. Relation entre l'action chimique et la quantité de chaleur produite. — Il résulte donc de ce qui précède que la chaleur produite par une pile a pour origine unique la réaction chimique qui s'accomplit dans les couples. Cette conséquence est beaucoup trop importante pour qu'on n'ait pas cherché à la vérifier directement par l'expérience; c'est ce qu'a fait M. Favre en introduisant un élément de pile (élément de Smée) avec ses conducteurs dans les moufles de son calorimètre (351). Il a trouvé ainsi qu'à la dissolution de 33 grammes de zinc correspond une production de chaleur égale à 18,796 calories (la calorie étant rapportée au gramme). Mais l'action chimique produite dans l'élément est multiple : il y a l'oxydation de 33 grammes de zinc par 8 grammes d'oxygène qui fournit une quantité de chaleur égale à 42,451 calories; la combinaison des 41 grammes d'oxyde de zinc avec 40 grammes d'acide sulfurique produisant 10,459 calories, ce qui fait en tout 52,907 calories. Mais un équivalent d'eau est décomposé, en absorbant 34,462 calories. Si nous retranchons ce nombre du précédent, nous trouvons 18,444 calories pour la chaleur résultant des opérations chimiques effectuées; or, ce nombre est pour ainsi dire identique avec celui que donne l'expérience directe, et la différence qui existe entre eux peut être attribuée aux erreurs inévitables d'observation.

573. Répartition de la chaleur dans les diverses parties du circuit. — Cette quantité totale de chaleur se manifeste par des phénomènes de température qui se produisent en différents points du circuit. Cette répartition est réglée par la loi de Joule, qui s'applique à une portion quelconque du circuit total. On voit, d'après cela, que s'il existe, par exemple, dans le conducteur interpolaire une portion très-résistante, comme, par exemple, un fil très-mince,

l'élévation de température sera considérable, mais la quantité de chaleur produite sera prise sur la quantité totale et, par conséquent, celle qui se rapporte à l'autre partie du circuit sera diminuée d'autant. M. Favre a vérifié directement ce résultat. On place au dehors du calorimètre une spirale de fil très-fin et on mesure directement la quantité de chaleur produite par le passage du courant. D'autre part, on détermine la quantité totale de chaleur fournie par la pile. On trouve un nombre moindre que celui qui a été indiqué tout à l'heure, mais qui en diffère précisément de la quantité correspondante à l'échauffement du fil extérieur.

574. Conversion de la chaleur en travail. — On trouve dans ces très-remarquables expériences une confirmation de la théorie qui considère la chaleur comme un mode spécial de travail. M. Favre ayant disposé une pile de cinq éléments de Smée dans une moufle d'un calorimètre, mit le circuit en communication avec un électro-aimant placé dans un second calorimètre; les fils extérieurs étaient assez gros pour qu'on pût négliger leur résistance. L'électro-aimant était d'ailleurs susceptible de mettre en mouvement un petit moteur qui, à l'aide de poulies placées au dehors, soulevait un poids.

Dans ces circonstances, si l'on fait circuler le courant dans l'électro-aimant sans que le moteur fonctionne, on trouve une quantité totale de chaleur précisément égale à celle qui résulte du travail chimique de la pile; mais si on établit les communications de manière que le poids soit soulevé, la quantité de chaleur communiquée au calorimètre est sensiblement moindre. Soit Q cette différence exprimée en calories, T le travail extérieur que l'on peut directement mesurer, exprimé en kilogrammètres, le quotient $\frac{T}{Q}$ donnera une expression de ce que nous avons appelé (357) l'équivalent mécanique de la chaleur. M. Favre a trouvé ainsi pour cet équivalent 444 kilogrammètres, nombre peu différent de celui que nous avons indiqué au paragraphe déjà cité (425 kilogrammètres) et qui résulte de l'expérience directe de M. Joule.

575. Lumière électrique. — Lorsque l'on termine les rhéophores d'une forte pile par deux cônes formés d'un charbon conducteur

tel que le coke, le charbon calciné, le charbon de cornue, et qu'on les rapproche jusqu'au contact, il se produit un jet lumineux d'une intensité éblouissante (fig. 509). Une fois le contact établi, on peut éloigner les deux charbons l'un de l'autre jusqu'à une distance plus

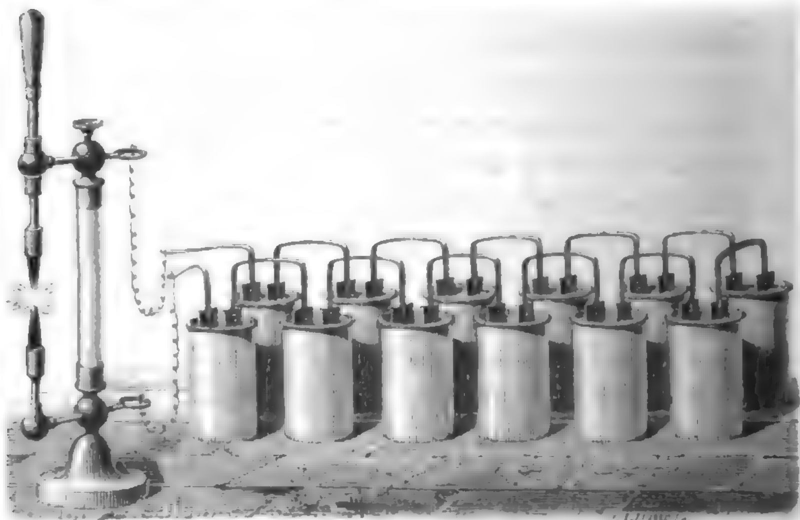


Fig. 509. — Lumière électrique.

ou moins considérable, suivant l'intensité du courant, mais qui peut aller jusqu'à 10 ou 12 centimètres. L'espace qui les sépare demeure occupé par un arc lumineux dont l'éclat et la température dépassent tout ce qu'on peut obtenir par les moyens connus; c'est ce que l'on appelle l'*arc voltaïque*. Cette brillante expérience a été faite pour la première fois dans le commencement du siècle par Humphry-Davy avec une pile de 3000 couples.

L'arc voltaïque ne doit pas être confondu avec la série d'étincelles que l'on obtiendrait en approchant l'un de l'autre deux corps chargés, l'un d'électricité positive et l'autre d'électricité négative; c'est un véritable circuit conducteur formé de particules volatilisées, transportées d'un pôle à l'autre, et faisant partie du courant au même titre qu'un fil métallique qui serait rougi par l'action voltaïque.

Ce transport de particules est extrêmement marqué dans les charbons, et en projetant leur image sur un écran on peut rendre le phénomène visible pour un grand nombre de spectateurs. Il suffit, pour faire cette projection, de disposer l'arc voltaïque dans une caisse

fermée, dont l'une des parois présente une lentille. La figure 510 montre l'image que l'on obtient en opérant de cette façon. En suivant l'expérience pendant quelque temps on peut apercevoir directement des particules de charbon incandescent traversant la lon-

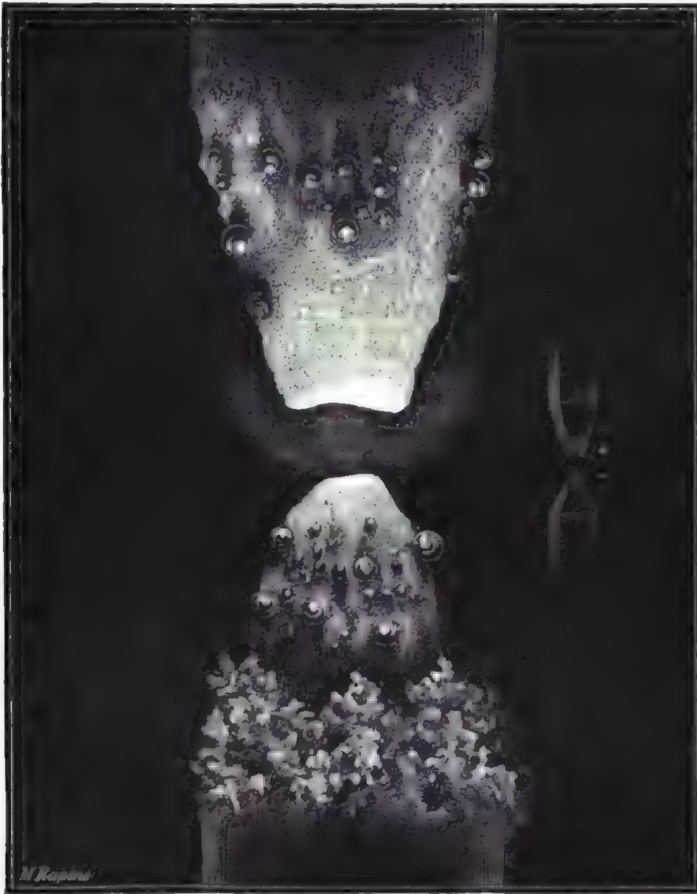


Fig. 510. — Image des charbons.

gueur de l'arc, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, mais plus fréquemment toutefois dans le sens même du courant. Cette circonstance explique la forme différente des deux charbons. Le charbon positif se creuse par suite de la perte de matière qu'il éprouve, tandis que l'extrémité négative semble s'accroître. En opérant dans le vide, le phénomène est beaucoup plus précis; une sorte de cône s'amasse au charbon négatif, tandis que le charbon positif se creuse

d'une cavité dont la forme semble reproduire celle de la matière transportée au pôle opposé; c'est la combustion qui empêche ces apparences d'être aussi marquées quand on opère dans l'air.

L'arc voltaïque offre la source de chaleur la plus intense que l'on connaisse. Dans des expériences qui sont restées classiques, Despretz a pu fondre et volatiliser des corps réputés jusque-là comme étant tout à fait réfractaires; le charbon lui-même s'est ramolli et a donné des traces non équivoques de fusion.

L'arc voltaïque, étant constitué par le courant lui-même, doit naturellement être sensible à l'action de l'aimant; cette prévision, si simple aujourd'hui, pouvait passer pour une conjecture bien hardie avant la découverte de l'électro-magnétisme; toutefois elle fut émise par Arago, qui se fondait sur l'analogie de l'arc voltaïque avec l'aurore boréale. Comme on savait depuis longtemps que ce dernier phénomène exerce une perturbation marquée sur les aiguilles aimantées, il supposa qu'il devait y avoir une action entre les aimants et l'arc voltaïque, ce qui fut vérifié par l'expérience. Aujourd'hui que l'on peut employer pour cette expérience de très-forts électro-aimants, elle se fait avec une très-grande netteté. M. Quet, par l'emploi d'un très-fort électro-aimant dont les pôles étaient placés de part et d'autre et à égale distance de la ligne qui joint les charbons, a pu repousser l'arc et le courber à la façon d'un dard de chalumeau, ainsi que le montre la figure 511.

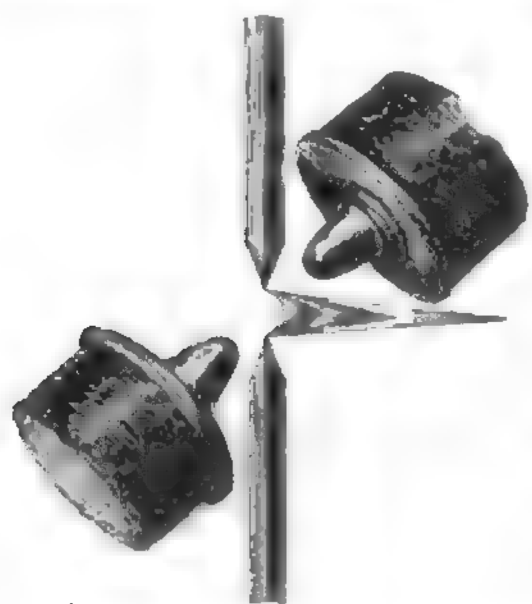


Fig. 511. — Action d'un aimant sur l'arc voltaïque.

576. Lumière de l'arc voltaïque. — La lumière de l'arc voltaïque a un éclat éblouissant, et depuis longtemps on a cherché à l'utiliser. L'insuccès de ces tentatives n'est pas seulement dû à l'infériorité économique de ce mode d'éclairage, mais aussi aux fâcheuses propriétés de la lumière électrique elle-même; celle-ci, en effet, a un caractère aigu qui blesse l'organe de la vision et peut même donner lieu à des accidents névralgiques plus ou moins graves. En outre, son pouvoir éclairant n'est pas en rapport avec son éclat, *elle brille plus qu'elle n'éclaire*, et surtout elle est difficile à

diviser et n'acquiert véritablement une intensité suffisante que lorsque déjà elle est trop vive. Il y a une application toutefois dans laquelle ces défauts n'ont aucune influence et où la lumière électrique trouve un emploi approprié à sa nature : c'est celle qui est relative aux phares. Ici, en effet, la lumière n'a pas besoin d'éclairer, elle doit seulement être *aperçue*, et, sous ce rapport, la lumière électrique paraît avoir, dans les temps brumeux, une pénétration supérieure à celle que fournissent les lampes à huile.

En dehors de cette application, on utilise la lumière électrique dans les cours pour remplacer la lumière solaire dans les expériences de projections ; on s'en sert beaucoup au théâtre pour la production d'effets lumineux très-divers ; on l'a employée quelquefois aussi avec succès pour l'éclairage des travaux de nuit. Comme les charbons s'usent par leur combustion, on doit faire usage, dans ces diverses circonstances, d'appareils régulateurs qui maintiennent les charbons à une distance convenable et donnent ainsi à la source lumineuse une fixité suffisante. Le principe des régulateurs assez nombreux, qui sont aujourd'hui connus, est toujours le même ; il consiste à utiliser les variations de l'intensité du courant, pour ramener les charbons polaires à la meilleure distance. Nous décrirons succinctement ici les régulateurs de M. Duboscq et de M. Foucault.

577. Régulateur de M. Duboscq. — Il se compose (fig. 512) d'un rouage d'horlogerie animé par un ressort moteur contenu dans le barillet P et régularisé par le volant à ailettes *g*. Sous l'action de ce rouage les deux crémaillères S et T sont mises en mouvement, la première par un pignon tenant au barillet, l'autre par une roue dentée concentrique, de même denture et de rayon double ; de cette façon la crémaillère T s'élève, S s'abaisse, mais la première se meut deux fois plus vite. C'est elle qui porte le charbon positif *c*; le charbon négatif *c'* est fixé à la pièce T' qui se meut avec la crémaillère S. On a reconnu par l'expérience que le charbon positif s'use deux fois plus vite que le charbon négatif, c'est pour cela qu'on lui fait faire deux fois plus de chemin. Mais si, au lieu de la pile, on se servait des machines électro-magnétiques que nous décrirons plus loin et dans lesquelles le courant change de sens à chaque révolution, chaque charbon serait alternativement positif et négatif, et il faudrait dans

ce cas les faire marcher avec la même vitesse. Le courant fourni par la pile entre par la borne R, anime l'électro-aimant BB, d'où il passe à la crémaillère T et de là au charbon positif *c*; du charbon négatif *c'* il se rend à la crémaillère S et sort par la borne R'. Le noyau en fer doux de l'électro-aimant attire un contact mobile K toutes les fois que le courant circule dans la bobine; au contact est attaché un levier coudé L mobile en F' autour d'un axe horizontal; il est poussé par le ressort antagoniste *s* et appuyé supérieurement contre un levier plus court *l* mobile autour de l'axe *o*. Ce petit levier porte à sa partie inférieure un bec en acier *m* destiné à arrêter une roue dentée placée à la partie inférieure du modérateur *g*.

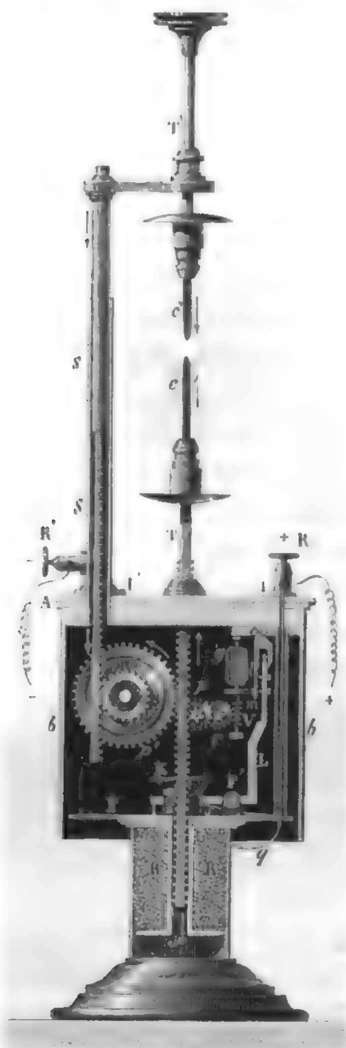


Fig. 512. — Régulateur de M. Duboscq.

Supposons que les deux charbons étant placés à la distance convenable, on lance le courant dans l'appareil, le contact est abaissé et le rouage arrêté par le bec inférieur du levier *l*; à mesure que les charbons s'usent, la résistance devient de plus en plus grande et il arrive un moment où l'intensité du courant est devenue assez faible pour que le ressort antagoniste produise son effet; le rouage est dégagé, les charbons se rapprochent, le contact est attiré de nouveau et il se produit un nouvel arrêt du rouage qui recommence bientôt à fonctionner, et ainsi de suite.

Un petit levier mobile à la main sert à arrêter à volonté le mouvement de l'appareil; le contact est d'ailleurs muni d'un pas de vis

qui permet de le rapprocher plus ou moins de l'électro-aimant, suivant la force de la pile dont on fait usage. Enfin, l'ensemble du rouage et des leviers est renfermé dans une boîte métallique dont une partie latérale peut être enlevée pour mettre à découvert la partie intérieure du mécanisme.

578. Régulateur de M. Foucault. — Le régulateur de M. Foucault est caractérisé par l'existence d'un double rouage moteur, susceptible de produire, suivant les circonstances, ou l'avance ou le recul des charbons; de cette façon, on peut éviter la mise en train à la main, qui a pour objet, au commencement, de placer directement les charbons à la distance la plus convenable; on prévient aussi l'extinction qui proviendrait de leur arrivée accidentelle au contact.

La figure 513 représente l'ensemble de l'appareil; on a seulement supprimé quelques pièces intermédiaires des rouages. E est un barillet contenant un ressort moteur dont le mouvement se communique par une série de mobiles au volant *o;* L est le second barillet contenant un ressort plus fort et dont le mouvement se communique au volant *o';* les crémaillères porte-charbons sont mises en mouvement par des roues dentées faisant corps avec le barillet E. La roue qui mène le charbon positif a un diamètre double de l'autre, si l'on se sert de la pile, pour que sa vitesse soit double. Si le courant provient d'une machine électro-magnétique, une petite addition permet de rendre les vitesses égales. Le courant arrive par la borne C, parcourt le fil de l'électro-aimant E et par la partie métallique de l'appareil arrive à la crémaillère D qui porte le charbon positif, traverse l'arc voltaïque, arrive au charbon négatif à la potence H et à une borne où se trouve fixé le rhéophore négatif de la pile. L'armature F de l'électro-aimant étant attirée, sa partie postérieure est soulevée, et ce mouvement est combattu par le ressort antagoniste R; mais celui-ci, au lieu d'agir directement sur la partie postérieure, agit à l'extrémité d'un levier placé au-dessus et mobile autour du point X. Ce levier présente à sa partie inférieure un profil curviligne, de sorte que son point de contact avec l'armature change et que le ressort agit avec un bras de levier variable suivant l'intensité du courant. Le résultat de cette disposition, connue sous le nom de *répartiteur de Robert-Houdin*, est que l'armature, au lieu

d'être simplement ou attirée ou repoussée, ainsi que cela arrive d'ordinaire, prend à chaque instant une position déterminée en rapport avec l'intensité du courant. Dans ces divers mouvements, le marteau T, lié à l'armature dans le voisinage de son point fixe, éprouve des oscillations correspondantes. Si le courant faiblit, la tête *t* se porte vers la droite, arrête le volant du barillet L et délivre *o*; les charbons s'avancent alors l'un vers l'autre. Si le courant devient trop intense, c'est *o* qui est arrêté et le barillet L fonctionne à son tour en produisant le recul. Lorsque le marteau T est exactement vertical, les deux volants *o* et *o'* sont arrêtés et les charbons sont fixes. La courbure du levier sur lequel agit le ressort étant très-faible, les oscillations de l'armature sont très-petites, il en est de même de celles de l'embrayeur, et par suite, malgré les variations du courant, les charbons n'avancent et ne reculent que de quantités extrêmement petites, ce qui donne au foyer lumineux un caractère remarquable de fixité.

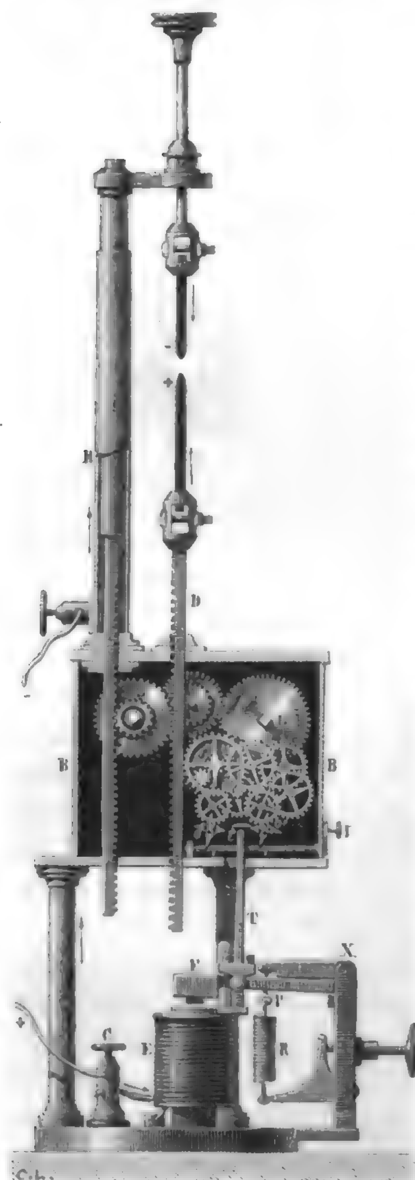


Fig. 513. — Régulateur de M. Foucault.

Pour empêcher que les deux systèmes d'avance et de recul se contrarient dans leur action sur les crémaillères, M. Foucault a fait

usage d'un organe mécanique fort ingénieux et appliqué avant lui dans quelques circonstances; c'est un rouage planétaire formé de cinq roues montées sur le même axe; d'un côté une roue et un pignon en relation avec l'un des rouages, de l'autre côté un système semblable appartenant à l'autre. Les deux systèmes sont indépendants l'un de l'autre et d'ailleurs libres sur l'axe; entre les deux pignons, et faisant corps avec l'axe, se trouve la roue marquée *s* sur la figure. Près de son bord, elle est traversée par un axe muni, à chacune de ses extrémités, d'un pignon satellite engrenant avec le pignon correspondant des rouages moteurs. Supposons d'après cela que le rouage de recul soit embrayé, la roue *s* tourne dans le sens que lui imprime le ressort, mais son pignon correspondant au second rouage ne fait que tourner autour du pignon avec lequel il engrène sans mettre en mouvement la roue. Supposons au contraire que ce soit le rouage de recul qui fonctionne, l'autre étant embrayé, son mouvement se transmet à la roue *s* par son pignon excentrique; cette roue tourne donc en sens contraire de tout à l'heure et par le second pignon ce mouvement est transmis au premier rouage qui se trouve ainsi remonté par l'action du second ressort; c'est pour pouvoir accomplir cette fonction que ce dernier ressort a une force beaucoup plus grande que le premier.

Cet appareil remarquable semble résoudre toutes les difficultés qui se rapportent à la fixation de la lumière électrique. Il est bon de remarquer à ce sujet que M. Foucault a le premier en France construit un régulateur photo-électrique, et qu'il a eu par conséquent le rare bonheur de donner sur la question le premier et presque le dernier mot.

CHAPITRE L.

MACHINES ÉLECTROMOTRICES. — TÉLÉGRAPHES.

579. Principe des électromoteurs. — Les machines électromotrices sont fondées sur l'aimantation temporaire que reçoit un morceau de fer sous l'influence d'un courant. Cette aimantation pouvant disparaître ou même changer de sens avec rapidité, on conçoit qu'on puisse, en lançant successivement un courant dans un circuit, imprimer à une armature des mouvements alternatifs qui peuvent ensuite être transformés d'une manière quelconque par les procédés ordinaires de la mécanique. Depuis 1834, époque à laquelle Jacobi, de Saint-Pétersbourg, construisit le premier électromoteur, bien des essais se sont produits, mais aucun n'a abouti à une application industrielle; on peut même dire qu'aujourd'hui la question est à peu près abandonnée. Les raisons de ces insuccès sont diverses. En première ligne, il faut placer l'observation indiquée dans le chapitre précédent (574) sur la nature du travail fourni par les électromoteurs. Ce travail est le résultat de la conversion d'une partie de la chaleur fournie par la pile ; or la production de la chaleur par la combustion ou l'oxydation du zinc est fort peu économique comparativement à celle qui résulte de la combustion de la houille. En second lieu, les attractions magnétiques décroissant rapidement avec la distance, il faudrait, pour obtenir un effet vraiment avantageux, maintenir constamment les armatures à une distance extrêmement petite des organes qui les attirent, et c'est là une difficulté pratique qu'on n'a pu lever que d'une manière incomplète. Enfin l'obstacle principal tient peut-être

à la production des courants induits qui résultent du mouvement même des pièces de l'appareil; on verra dans un des chapitres suivants que, suivant la loi qui règle la production de ces courants (loi de Lenz), ils doivent être de sens contraire à celui du courant principal fourni par la pile, d'où résulte cette singulière et fâcheuse conséquence, que plus on augmentera la vitesse, plus on diminuera l'action du courant qui produit le mouvement de l'appareil. Aussi le prix du travail fourni par les meilleures machines électromotrices est-il près de trente fois plus élevé que celui que donnent les machines à vapeur; cette proportion interdit pour longtemps l'espoir d'un emploi sérieux des électromoteurs. Mais si l'électricité ne paraît pas quant à présent un moyen économique de produire la force, elle présente ce merveilleux avantage de pouvoir la transporter presque instantanément à des distances immenses; c'est là le principe des appareils télégraphiques que nous décrirons un peu plus loin. Quant aux machines électromotrices, nous en ferons connaître deux qui suffiront au lecteur pour lui faire comprendre la disposition de ce genre d'appareils.

580. Machine de M. Bourbouze. — La machine de M. Bourbouze est à mouvements alternatifs. Elle se compose (fig. 514) de deux hélices dans l'intérieur desquelles se trouvent deux noyaux fixes en fer doux, n'occupant que la moitié de la hauteur. Deux autres cylindres pouvant pénétrer dans l'intérieur des hélices sont articulés aux extrémités d'un balancier qui, à l'aide d'une bielle et d'une manivelle, peut mettre en mouvement un volant. Le fil positif de la pile est en communication permanente avec une pièce qui se meut alternativement dans un sens et dans l'autre sur une petite plaque d'ivoire, aux extrémités de laquelle sont fixés les bouts inférieurs du fil de l'hélice, les bouts supérieurs communiquant toujours avec le fil négatif. Le mouvement alternatif de la petite plaque de métal est obtenu par le jeu d'un excentrique calé sur l'axe du volant, de la même façon que celui du tiroir dans les machines à vapeur.

Dans la position indiquée par la figure, la plaque conductrice est entre les deux contacts sans toucher aucun d'eux, les armatures mobiles sont engagées dans les hélices de la même quantité, la machine est au repos et sa bielle est placée à 90° des points morts,

c'est-à-dire dans la position la plus favorable pour agir sur la manivelle. Dans cette situation, poussons le volant à la main de façon à faire communiquer la plaque avec le contact de gauche, l'hélice correspondante s'aimante et l'armature pénètre dans l'intérieur. A

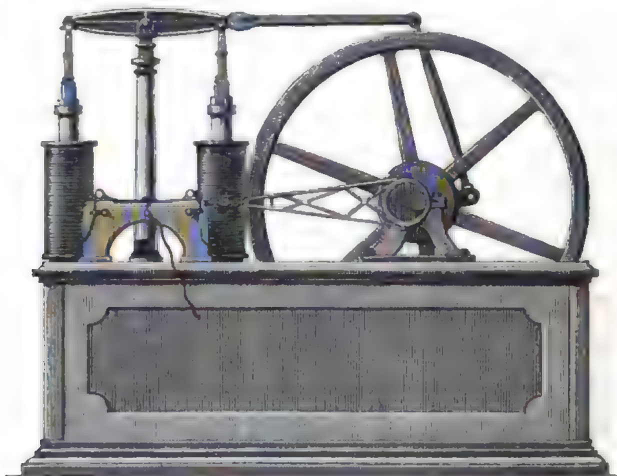


Fig. 514. — Électromoteur de M. Bourbouze.

sa position la plus inférieure correspond le point mort de la manivelle, qui est dépassé en vertu de la vitesse acquise, la plaque revient sur elle-même, vient toucher le contact de droite, d'où résulte le mouvement inverse du balancier jusqu'au second point mort, et ainsi de suite. Les armatures mobiles restent toujours à une petite distance des armatures fixes et n'éprouvent, par conséquent, que de très-légers déplacements; c'est pour cela qu'on prolonge le balancier de façon à le faire agir par un bras de levier suffisant sur la bielle. Afin de donner un peu plus de force à la machine, on emploie des hélices doubles; les armatures correspondantes à chacune d'elles sont réunies supérieurement par une pièce qui s'articule au balancier.

581. Moteur de Froment. — Le moteur de Froment est à rotation directe. Il se compose (fig. 515) d'une roue portant sur sa circonférence huit armatures en fer doux qui viennent passer pendant le mouvement devant quatre électro-aimants établis sur un bâti en fonte.

Si l'on suppose qu'une des armatures soit à une petite distance d'un électro-aimant et qu'on vienne à faire passer le courant, il y a une attraction et le mouvement commence. Au moment où

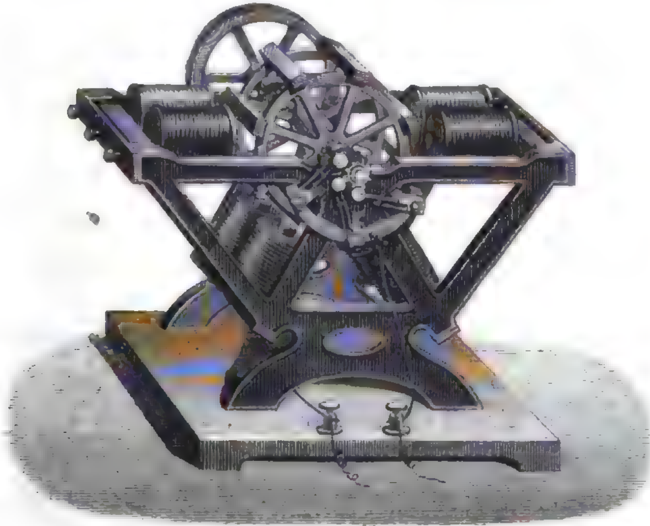


Fig. 515. — Électromoteur de Froment.

l'armature arrive en regard de la pièce attirante, le courant cesse, mais le mouvement se continue en vertu de la vitesse acquise. L'armature dépasse le milieu de l'intervalle qui la sépare de l'électro-aimant suivant, alors le courant passe dans ce dernier, et ainsi se produit une série d'impulsions qui entretiennent le mouvement de la roue. Comme il y a huit armatures mobiles, il y en aura toujours quatre qui seront dans la position convenable pour recevoir les impulsions des électro-aimants.

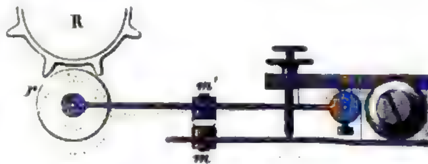


Fig. 516. — Détail du distributeur.

Quant à la distribution de l'électricité, voici comment elle s'effectue. Le courant arrive dans un arc métallique fixe sur lequel sont établies trois lames en communication continue avec l'un des bouts des fils des électro-aimants, l'autre bout communiquant avec l'autre pôle de la pile. Ces lames ne sont pas en communication électrique

avec l'arc, mais cette communication est établie par les contacts *m* et *m'* (fig. 516) qui sont amenés l'un sur l'autre au moment où l'une des cames de la roue R soulève le galet *r*; le courant passe alors dans les hélices. Des trois distributeurs, l'un est destiné aux électro-aimants horizontaux qui fonctionnent simultanément, les deux autres aux électro-aimants inférieurs. Le fonctionnement de la roue à cames est tel, que le courant ne cesse dans un électro-aimant qu'après avoir passé dans le suivant; on évite ainsi, du moins en partie, l'étincelle d'induction qui se produit toujours, ainsi que nous le verrons plus tard, lorsqu'on ouvre un circuit et qui a l'inconvénient grave d'amener, en oxydant les contacts, des irrégularités dans le mouvement de l'appareil.

582. Télégraphie électrique. — Historique. — Aussitôt qu'on eut constaté la très-grande vitesse avec laquelle se propage la décharge dans un circuit conducteur (466), on songea à utiliser ce moyen de transmettre des signaux à distance. Déjà en 1747 Cavendish et Graham s'envoyaient des décharges de batteries à plusieurs milles de distance. En 1774, Lesage établit à Genève un véritable télégraphe composé de 24 fils isolés et communiquant avec 24 électroscopes dont chacun représentait une lettre. La même année, Reiser, en Allemagne, proposait de remplacer les électroscopes par des espèces de carreaux étincelants représentant les lettres elles-mêmes. Ces essais ne pouvaient aboutir à aucun résultat sérieux, l'électricité fournie par les machines ordinaires étant par trop difficile à contenir et incapable de suivre sans se perdre un conducteur de quelque étendue. La découverte de Volta permit de résoudre cette difficulté considérable de la transmission à une grande distance. En effet, l'électricité dynamique qui constitue le courant s'attache bien plus aux corps conducteurs, et quoique soumise à la déperdition, elle peut néanmoins être transmise à de très-grandes distances. En même temps que le courant il fallait le signal; on chercha à utiliser dans ce but les décompositions chimiques et les phénomènes de commotion et de lumière que l'on peut produire avec la pile. En 1811, Sœmmering, de Munich, proposait un système télégraphique composé de 35 fils aboutissant à 35 voltamètres représentant les lettres et les chiffres.

La découverte d'Œrsterd, en 1819, fournit une nouvelle ressource et d'un emploi bien plus commode. Ampère proposa, en effet, peu de temps après, de remplacer les signaux chimiques de Sœmmering par des galvanomètres dont chacun aurait été affecté à une lettre où à un chiffre. Mais l'emploi de 24 courants est une chose bien compliquée et il n'est pas permis de voir dans cette idée de l'illustre savant français le germe de la télégraphie actuelle. C'est véritablement à la découverte du multiplicateur de Sweiger que celle-ci est due. Avec le multiplicateur on peut faire qu'une aiguille mobile dans un plan vertical, et maintenue verticale elle-même par un léger excès de poids à sa partie inférieure, puisse recevoir une déviation brusque vers la droite ou vers la gauche, suivant qu'on lance le courant dans un sens ou dans l'autre. Ce sont là des signaux parfaitement nets, pouvant être effectués rapidement, car, en vertu de son excès de charge, l'aiguille reprend vite sa position verticale. Il n'est d'ailleurs besoin que d'un seul courant. Cet ingénieux système est dû à Schelling, qui fit ses premiers essais en Russie, mais qui ne réussit pas à le faire fonctionner sur une grande échelle. Il est juste, malgré cet insuccès, de considérer ce savant comme un des fondateurs de la télégraphie électrique, et, en réalité, la combinaison imaginée par lui, légèrement améliorée par M. Wheatstone, fut établie en Angleterre vers 1840, et fonctionne encore actuellement sur quelques lignes de ce pays.

Schelling avait ajouté à son appareil une sorte d'avertisseur imparfait. M. Wheatstone en imagina un beaucoup mieux conçu dans lequel était utilisée la propriété que possède le fer de s'aimanter temporairement sous l'action du courant. Cette propriété fournit d'ailleurs des ressources mécaniques très-grandes pour les signaux télégraphiques eux-mêmes et c'est sur elle surtout que sont fondés la plupart des appareils aujourd'hui en usage. M. Wheatstone lui-même construisit un télégraphe fondé sur l'aimantation temporaire du fer doux et qui fut pendant quelque temps employé sur quelques lignes.

Les systèmes de télégraphes sont fort divers et il serait impossible, sans sortir du cadre d'un traité élémentaire, de faire connaître tous ceux dont le principe a quelque intérêt. Nous nous bornerons

à décrire sommairement ceux qui sont employés en France. Mais avant, nous dirons quelques mots sur la production et la transmission du courant.

583. Piles. — Les piles employées le plus communément sont des piles de Daniell chargées avec de l'eau pure du côté du zinc. Le côté du cuivre est chargé avec une dissolution de sulfate de cuivre, mais on ne verse pas la dissolution directement, on charge les deux compartiments avec de l'eau, ce qui donne plus de facilité à l'opération, puisque, le liquide étant le même, il n'y a pas de précautions à prendre pour ne pas verser dans un compartiment le liquide destiné à l'autre. On place ensuite des cristaux de sulfate de cuivre sur des diaphragmes ménagés à cet effet et qui plongent dans l'eau, les cristaux se dissolvent graduellement et la dissolution ne tarde pas à être saturée. La pile ainsi montée fonctionne pendant plusieurs mois sans qu'on ait besoin d'y toucher. La substitution de l'eau pure à l'eau acidulée est fort rationnelle; elle a pour effet sans doute d'affaiblir le courant, mais ce n'est qu'un inconvénient secondaire, car à l'aide des relais on peut se contenter d'un courant de ligne très-faible. En revanche, l'eau pure donne à la pile une résistance très-considérable, et dès lors les variations qui se produisent toujours sur la ligne ont un effet moins marqué sur la marche des appareils.

On se sert aussi quelquefois de la pile de M. Marié-Davy. Elle est à charbon comme celle de Bunsen et chargée à l'eau pure du côté du zinc. Quant au charbon, il plonge dans une pâte formée de sulfate de mercure. L'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau réduit l'oxyde de mercure, le métal coule au fond du vase poreux, on peut le recueillir et le transformer de nouveau en sulfate.

584. Lignes. — Les fils qui servent à la transmission du courant sont en fer galvanisé, c'est-à-dire recouvert d'une couche de zinc; ils sont supportés par des poteaux en bois injecté et fixés sur ces derniers à l'aide de pièces en porcelaine (fig. 517) dont la forme varie d'un pays à l'autre, mais qui protégent toujours une portion du fil contre la pluie.

Les lignes sont quelquefois souterraines; on emploie dans ce cas pour isoler les fils le caoutchouc, la gutta-percha ou diverses

combinaisons de ces substances. Les fils souterrains éprouvent une déperdition moins grande que les fils en l'air, mais outre qu'ils coûtent plus cher, ils sont moins propres, à cause de l'induction terrestre, à un travail rapide. Aussi en France on ne les emploie guère que pour la traversée des villes et dans les cas, très-rares d'ailleurs, où l'installation des fils en l'air serait impossible.

On avait cru à l'origine qu'il fallait, pour transmettre le courant destiné à animer les appareils télégraphiques, un double fil formant un circuit complet. C'est M. Steinheil, de Munich, qui eut, vers 1837, la première idée de la suppression du fil de retour; il réussit à faire circuler un courant dans un fil unique dont les extrémités étaient en communication avec le sol, et il constata que le courant avait la même intensité que si les deux bouts du fil se fussent rejoints de manière à former un circuit complet. La terre agit donc comme un conducteur de résistance nulle, résultat parfaitement d'accord avec la loi de Ohm.

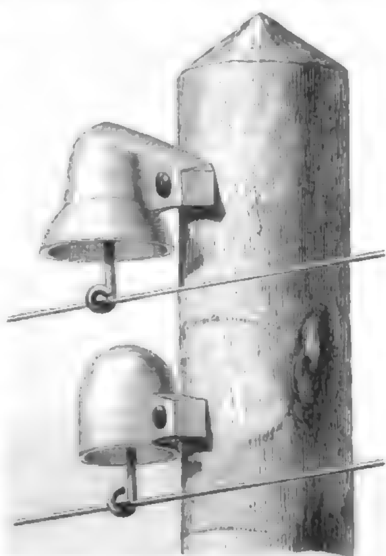


Fig. 517. — Supports des fils de ligne.

Il n'est pas probable toutefois que la terre doive être considérée comme jouant le rôle d'un fil de retour en réunissant les deux pôles de la pile, les expériences faites sur ce sujet par Faraday paraissent conduire à une conclusion différente. Si l'on se représente le circuit traversé par un courant coupé quelque part, le courant s'arrête et les deux extrémités tendent à se charger l'une de fluide positif, l'autre de fluide négatif; c'est à leur réunion continue, c'est-à-dire en réalité à leur disparition, que le courant doit son existence. Or on conçoit que cette disparition puisse être amenée par la décharge continuelle dans un conducteur d'immense étendue; c'est probablement ce qui a lieu quand les extrémités du fil télégraphique communiquent avec le sol. Le courant positif et le

courant négatif vont se perdre dans le réservoir commun et ainsi se trouve entretenue l'activité des forces qui développent l'électricité.

585. Télégraphe à cadran. — Ce télégraphe est surtout employé sur les lignes de chemin de fer. Opérant avec les lettres ordinaires de l'alphabet et d'un maniement d'ailleurs facile, il n'exige aucune connaissance technique chez les employés qui s'en servent : c'est là surtout l'avantage qu'il présente dans les chemins de fer où on peut appliquer à le faire fonctionner le personnel ordinaire. Nous distinguerons dans cet appareil, comme dans tous les appareils télégraphiques en général, deux parties distinctes : le récepteur qui reçoit et effectue le signal, le manipulateur qui le transmet.

La figure 518 représente le récepteur vu extérieurement. Le cadran porte les 25 lettres de l'alphabet qui, avec la croix, forment 26 signaux. La réception consiste à observer l'aiguille qui se meut de gauche à droite en s'arrêtant un instant devant chacune des lettres qui forment le mot et devant la croix à la fin de chaque mot. Voici la manière dont se produisent ces mouvements de l'aiguille.



Fig. 518. — Récepteur du télégraphe à cadran.

Un électro-aimant horizontal (fig. 519), formé de deux bobines réunies par une plaque de fer à leur partie postérieure, est placé à la partie inférieure de la boîte qui contient tout le mécanisme ; cet électro-aimant a été enlevé sur la figure, on y voit deux cercles qui représentent sa section. En face des extrémités est disposée une armature A, mobile autour d'un axe horizontal VV′ et soumise à l'action du ressort antagoniste *f* qui tend à l'éloigner des pôles. La tension de ce ressort peut être modifiée par le moyen d'une clef qu'on peut manier du dehors et qui agit sur le ressort par l'intermédiaire

d'un levier. On voit donc que, si un courant vient à passer, l'armature sera attirée; s'il cesse de passer, elle reviendra sur elle-même par l'action du ressort antagoniste. A l'armature est fixée une tige verticale *l* se terminant supérieurement par une partie horizontale *c* :

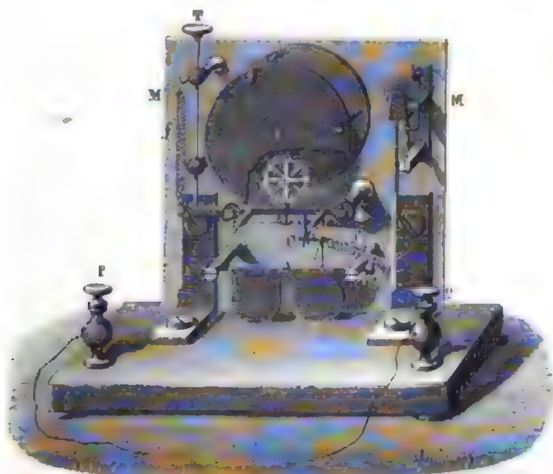


Fig. 519. — Mécanisme du récepteur.

cette tige participe naturellement à l'oscillation de l'armature. Or l'extrémité *c* pénètre entre les dents de la fourchette *d*, qui est elle-même fixée à l'axe *ab*, et enfin celui-ci porte supérieurement la pièce verticale *i*. Cette dernière exécutera donc en avant et en arrière des mouvements correspondants à ceux de l'armature. Son extrémité supérieure arrive au contact des dents d'une roue d'échappement O formant le terme d'un rouage moteur ordinaire.

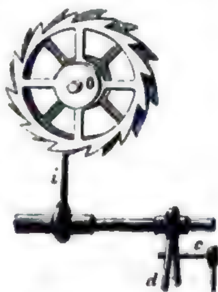


Fig. 520. — Détail de l'échappement.

Cette roue O est double (fig. 520), elle porte à sa partie antérieure 13 dents et un même nombre à sa partie postérieure, ce qui fait en tout 26, mais les premières se trouvent dans l'intervalle des secondes. Cela posé, supposons que le courant ne passe pas; la fourchette *d* est en avant, la pièce *i* en arrière, et dans cette situation elle arrête une des dents de la partie postérieure de la roue. Si on vient à faire passer un courant, l'armature est

attirée et la pièce *i* se porte en avant, elle délivre par conséquent la dent qui était en prise avec elle à la partie postérieure et vient en arrêter une à la partie antérieure ; si le courant cesse, il se produit un mouvement inverse, qui produit l'arrêt de la dent suivante de la roue postérieure, et ainsi de suite. On voit donc que si on fait passer le courant 13 fois successivement, il y aura 26 petits mouvements de la roue qui correspondront à une révolution entière. Or c'est l'axe de la roue qui porte l'aiguille et c'est à chacun de ses points d'arrêt que correspondent les lettres du cadran. Si donc l'extrémité de l'aiguille est à la croix, il suffira, pour la faire arriver à une lettre quelconque, de lancer le courant dans l'électro-aimant de façon que la somme des émissions et des interruptions fasse un nombre égal au rang qu'occupe la lettre dans l'alphabet. C'est cette opération que l'on effectue à distance à l'aide du manipulateur.

586. Manipulateur. — Le manipulateur se compose d'un cadran en cuivre sur lequel se trouvent gravées les 25 lettres de l'alphabet avec la croix. Au centre du cadran s'articule une manivelle à poignée que l'on peut faire mouvoir en la soulevant légèrement de manière à lui faire parcourir toutes les parties du cadran. A chaque lettre correspond un trou dans lequel on peut engager une goupille fixée à la poignée, c'est la position exacte pour que le récepteur fasse la lettre en question. Voici comment cela se produit.

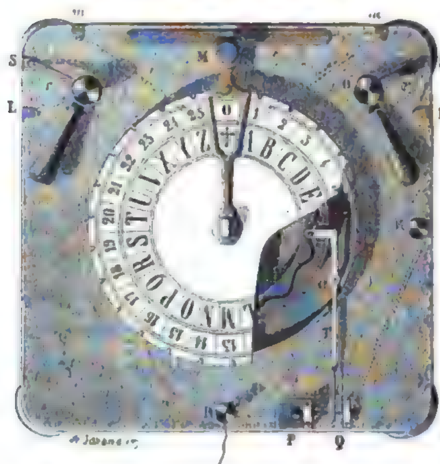


Fig. 521. — Manipulateur du télégraphe à cadran.

La manivelle dans son mouvement entraîne une roue (fig. 521) dont le profil sinueux présente 13 saillies et 13 excavations ; sur ce profil s'appuie par un galet l'une des extrémités d'un levier T mobile autour du point *a*, et dont l'extrémité opposée oscille entre les deux pointes P et Q. Quand le levier est sur une saillie, il com-

munique avec P; il communique avec Q quand il est sur une excavation. C'est le cas de la figure.

Le courant de la pile entre par la borne R et la roue est en communication permanente avec la ligne et par suite avec le récepteur qui doit recevoir le signal. Supposons d'après cela la manivelle sur la croix, la tête du levier est sur une excavation et le courant ne passe pas. Si on fait tourner de manière qu'il monte sur la première saillie, le courant est lancé dans la ligne et le récepteur marque la lettre A; à l'excavation suivante le courant est interrompu, la lettre B est faite par le récepteur, et ainsi de suite. Si donc les deux appareils sont l'un et l'autre au signe initial, il y aura une concordance absolue dans leurs indications.

587. Sonnerie. — Indépendamment du manipulateur et du récepteur, il existe dans chaque appareil une pièce appelée *avertisseur,* qui est destinée à prévenir par une sonnerie de l'envoi d'une dépêche. Ces appareils sont assez variables de forme; notre figure représente la sonnerie à trembleur qui est une des plus simples. Elle se compose (fig. 522) d'un électro-aimant *e* au-devant duquel est placée une armature *f* portée par une lame élastique; lorsqu'il n'y a pas de courant, l'armature est au contact d'une pièce *g* en communication avec la borne *m*. Les extrémités du fil de l'électro-aimant aboutissent aux bornes *p* et *p'*, et la première communique avec la lame élastique qui supporte l'armature. Supposons un courant arrivant par *m*, il circulera dans l'électro-aimant et par suite l'armature sera attirée. Mais le contact de l'armature avec *g* cessant, le courant sera interrompu et l'armature ramenée au contact de *g* : nouvelle émission du courant suivie à son tour d'une interruption, et ainsi de suite. Il se produira donc pendant toute la durée du passage du courant une vibration de l'armature. Celle-ci porte à sa partie supérieure une tige terminée par le

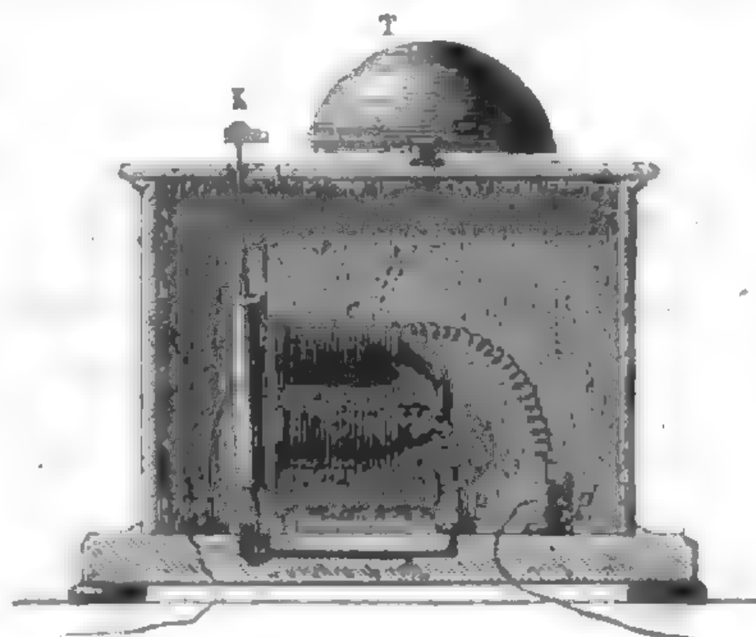


Fig. 522. — Sonnerie à trembleur.

marteau K qui vient frapper sur un timbre T et produit ainsi l'avertissement.

Dans un poste télégraphique qui doit communiquer dans un sens et dans l'autre de la ligne, il y a deux sonneries et aussi deux récepteurs, car on peut recevoir simultanément deux dépêches de directions opposées. Quant au manipulateur, il est unique, et les diverses pièces que l'on voit sur la figure 522 sont destinées à permettre le double service de l'appareil. Au repos, la tête T est sur une excavation et son extrémité est en communication avec Q, qui communique lui-même avec le récepteur R. Les lignes L et L' communiquent par les contacts r et r' avec les sonneries S et S'. L'une d'elles vient-elle à se faire entendre, on place les contacts r ou r' sur les languettes aboutissant en m, le courant peut alors traverser l'appareil et arriver aux récepteurs. La communication avec la ligne étant d'ailleurs établie, on peut répondre en faisant fonctionner le manipulateur.

Le télégraphe à cadran présente plusieurs graves inconvénients : les signaux ne sont pas indépendants, et si, par quelque irrégularité de transmission, il a été passé une lettre erronée, toutes celles qui suivent le sont également. Ces erreurs peuvent d'ailleurs être fréquentes; il se produit en effet continuellement des variations dans l'état du courant qui peuvent amener un défaut de mesure dans la force du ressort antagoniste ou dans la course de l'armature, éléments que l'on est obligé de régler de temps à autre. Quand cela se rencontre, le courant ne fait pas fonctionner l'échappement à chaque émission et à chaque interruption; il s'établit ainsi un désaccord entre le manipulateur et le récepteur, ce qui donne toujours lieu à une perte de temps. Ajoutons que la dépêche ne laisse aucune trace et que, par suite, la sûreté de la réception est subordonnée à l'intelligence ou même à la fidélité des employés. Aussi les télégraphes à cadran doivent-ils être considérés comme impropres à un service un peu étendu. Les grandes lignes sont desservies ou par le télégraphe Morse ou par le télégraphe Hughes.

588. Télégraphe Morse. — Le télégraphe Morse est employé non-seulement en France, mais dans un grand nombre de pays étrangers. Son mécanisme est d'une simplicité et d'une sûreté remarquables. Inventé en Amérique, vers 1837, à l'époque où Wheat-

stone faisait fonctionner les premiers télégraphes à aiguilles, il a fait depuis le tour du monde.

Une plaque de fer doux mobile autour d'une charnière en face d'un électro-aimant (fig. 523), un crayon attaché à la tige qui fait

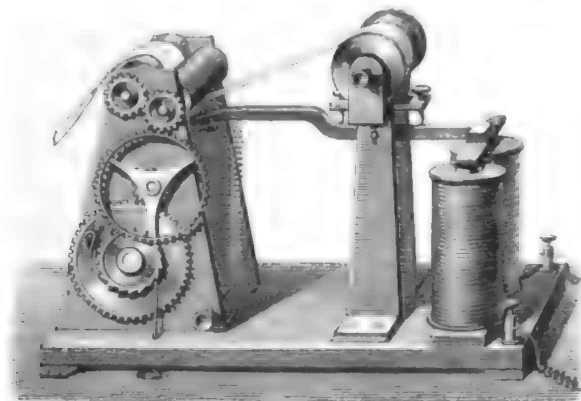


Fig. 523. — Télégraphe de Morse.

contre-poids à la plaque de fer doux, une bande de papier qui se déroule devant le crayon et reçoit sa trace lorsque la plaque de fer doux est attirée, tel est le télégraphe de Morse dans sa simplicité primitive. C'est l'utilisation simple, directe, sans mécanisme de la force de l'électro-aimant. Au crayon qui s'émoussait rapidement et ne marquait plus ou marquait mal, on substitua bientôt une pointe d'acier qui donnait des signes gaufrés. Ceux-ci sont souvent peu visibles et exigent une assez grande force, on les a remplacés en France par des signes à l'encre plus visibles et plus faciles à former.

589. Récepteur. — La figure 524 représente un récepteur Morse, modèle modifié par MM. Digney, constructeurs français. Un rouage d'horlogerie que l'on ne voit pas sur la figure fait tourner l'un des cylindres d'une espèce de laminoir *n* dans lequel passe une bande de papier *p* fournie par le rouleau-magasin K. Le même rouage fait tourner sur place la molette H dont la jante se charge constamment d'une encre grasse bleue en frottant contre le tampon L. L'armature BB' de l'électro-aimant A, mobile autour du point C, se recourbe à son extrémité B' et vient tout proche du papier. Au moment où le courant passe, l'armature est attirée par

l'électro-aimant, son extrémité recourbée soulève le papier et l'applique contre la molette H; il se produit ainsi, suivant la durée du contact, un point (-) ou un trait (—). Si le courant cesse,

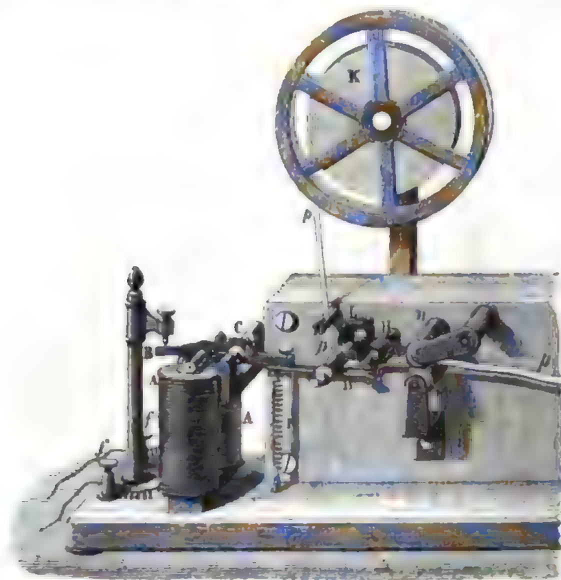


Fig. 524. — Récepteur du télégraphe Morse modifié.

l'armature rappelée par le ressort antagoniste D revient à sa position première.

590. Manipulateur. — Le manipulateur (fig. 525) est simplement une pièce de cuivre mobile autour d'une charnière A et soulevée par le ressort *f*. En pressant sur le bouton K l'employé établit le contact entre *c* et *d* et lance ainsi sur la ligne L le courant

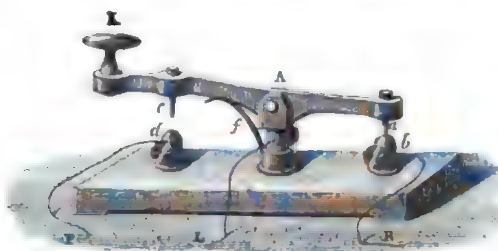


Fig. 525. — Manipulateur du télégraphe Morse.

qui provient de P. Quand le marteau est soulevé, il s'établit à la partie postérieure un contact entre *a* et *b*, et le manipulateur sert dans ce cas à recevoir le courant de la ligne et à le transmettre au récepteur ou au relais.

Suivant le temps que l'employé maintient le contact entre *c* et *d*, il se produit à la station des traits plus ou moins longs. On a combiné le trait court et le trait long pour faire l'alphabet suivant :

·—	—···	—·—·	—··	·	··—·	——·	····	··
a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*

·———	—·—	·—··	——	—·	———	·——·	——·—
j	*k*	*l*	*m*	*n*	*o*	*p*	*q*

·—·	···	—	··—	···—	—··—	—·——	——··	··—··
r	*s*	*t*	*u*	*v*	*x*	*y*	*z*	*é*

·——	————	·————	··———	···——	····—
w	*ch*	*1*	*2*	*3*	*4*

·····	—····	——···	———··	————·	—————
5	*6*	*7*	*8*	*9*	*0*

La figure 526 représente l'appareil Morse R en relation avec ce qu'on appelle le relais R'. C'est un électro-aimant qui est traversé par le courant de la ligne au moment d'une transmission ; son armature

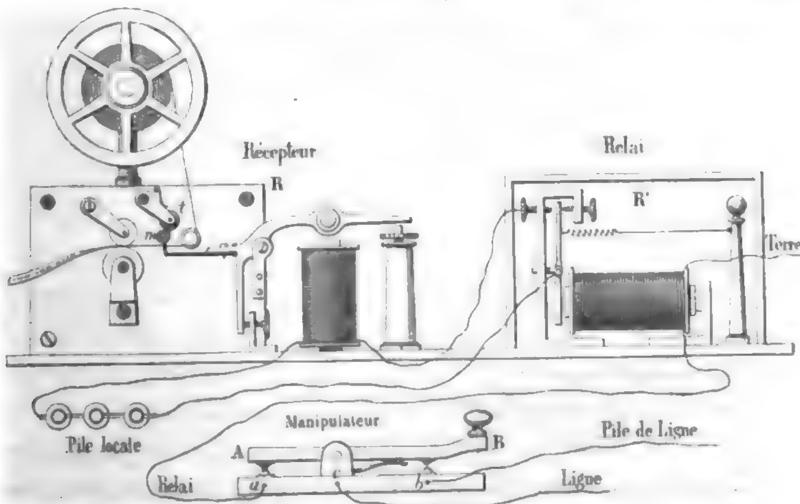


Fig. 526. — Appareil Morse avec son relais.

est alors attirée et ce mouvement donne lieu, à la partie supérieure, à un contact qui introduit dans le récepteur le courant d'une pile locale. Le mécanisme est mis en mouvement par ce courant, de sorte que celui de la ligne peut être très-faible sans inconvénient, puisqu'il n'a qu'à faire mouvoir l'armature du relais que l'on peut

rendre très-légère. On voit aussi dans la figure comment le manipulateur, sur son contact naturel *a*, sert à recevoir le courant de la ligne et à le transmettre au relais.

Les appareils Digney peuvent souvent se passer de relais ; mais lorsque au lieu de la molette actuelle on avait la pointe d'acier, le relais était indispensable. Les relais peuvent être établis pour renouveler sur son parcours le courant d'une ligne quand celle-ci est très-longue. On établit aussi des relais de sonnerie quand le timbre et le marteau de l'avertisseur ont un volume considérable.

591. Télégraphe Hughes. — L'appareil de Morse, remarquable par son extrême simplicité, ne saurait se prêter à un travail rapide, puisqu'il exige en moyenne trois émissions de courant par lettre ou par signe. L'extension du service télégraphique a provoqué les recherches des inventeurs dans le but surtout d'atteindre une grande rapidité. M. Hughes a, vers 1859, fait connaître un télégraphe qui imprime une lettre par chaque émission, et qui produit par conséquent un travail à peu près triple de celui que peut donner le système de Morse. Cet immense avantage est acheté par une complication extrême ; il faut en outre pour le maniement de l'instrument des employés habiles et exercés : aussi ne peut-il guère être appliqué que sur des grandes lignes. Nous allons essayer de faire comprendre les dispositions fondamentales de cette étonnante machine télégraphique.

La figure 527 représente l'ensemble de l'appareil. Il est formé d'un puissant rouage d'horlogerie dont le poids moteur atteint 50 ou 60 kilogrammes et qui est régularisé par une lame vibrante *l*. Un curseur mobile sur la lame permet de modifier la durée de la vibration. Sous l'action du rouage trois axes sont mis en mouvement avec des vitesses différentes : 1° l'axe des lettres ou des types, ainsi nommé parce qu'il se termine par une roue T portant sur son pourtour gravées en relief les 25 lettres de l'alphabet séparées par un blanc ; 2° l'axe imprimeur ou axe des cames, dont la vitesse de rotation est beaucoup plus grande que celle du précédent et peut aller jusqu'à 700 tours par minute ; il se termine par le volant V. Ces deux axes sont horizontaux et sont représentés séparément dans la figure 528 ; 3° un axe vertical *a* auquel l'axe des types



Fig. 527. — Télégraphe Hughes.

imprime une rotation exactement égale à la sienne à l'aide de deux roues d'angle.

L'arbre vertical est composé de deux parties métalliques isolées l'une de l'autre par un disque d'ivoire; ces deux parties communiquent ordinairement l'une avec l'autre par la vis V, mais les parties v' et v peuvent se disjoindre.

Le bras formé par les pièces v' et v se nomme le *chariot;* il tourne avec l'arbre a au-dessus d'un disque D percé d'autant de trous qu'il y a de lettres ou de signes sur la roue des types. Ces trous sont rangés circulairement autour du pied de l'arbre, et c'est

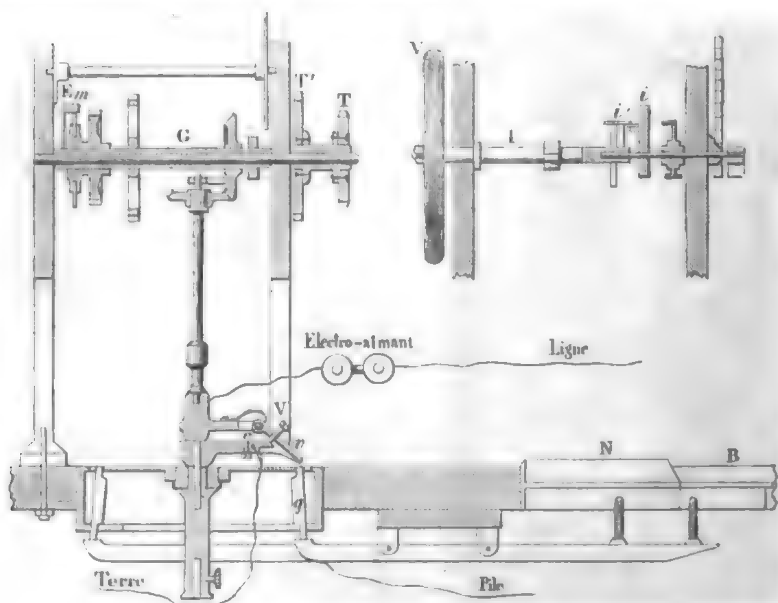


Fig. 528. — Axe des types et axe imprimeur.

exactement au-dessus d'eux que passe l'extrémité du chariot. Dans ces ouvertures sont disposées des tiges métalliques ou *goujons* g qui se soulèvent d'une petite quantité au-dessus du disque, quand on appuie sur les touches correspondantes B, N d'un clavier tout à fait analogue à celui d'un piano. Quand le chariot passe au-dessus d'un des goujons soulevé, l'extrémité du bras est légèrement déplacée, et v' se trouve isolé de v. Par suite de cette disposition, le courant de la pile, qui arrivait au goujon et de là se perdait dans la terre.

se rend dans v pour passer ensuite dans l'électro-aimant de l'appareil et de là sur la ligne. C'est en cela que consiste la *manipulation* ; nous allons voir maintenant comment par l'émission de ce courant une certaine lettre (la même) est imprimée par la roue des types dans les deux appareils, qui sont d'ailleurs complétement identiques, et dans lesquels se trouvent réunis le manipulateur et le récepteur.

Le courant passe sur deux électro-aimants E placés au-dessus des pôles d'un aimant permanent en fer à cheval et il est dirigé de façon à contrarier l'action de l'aimant sur une palette p en fer doux qui est attirée par les noyaux des bobines, mais qui est sollicitée à s'écarter par l'action d'un ressort. Le courant pourra donc être très-faible si la différence de force de l'aimant et du ressort est peu considérable ; c'est là une des particularités originales de l'appareil de Hughes et la cause de son extrême sensibilité.

L'axe imprimeur se compose de deux parties : l'une I porte le volant V et tourne constamment sous l'action du moteur ; l'autre, qui se termine à la partie antérieure de l'appareil, est tenue en repos par un cliquet articulé ii' ; mais lorsque l'armature de l'électro-aimant se soulève, elle produit l'embrayage de la partie antérieure, qui se trouve ainsi entraînée ; au bout d'un tour le cliquet se dégage et l'axe s'arrête.

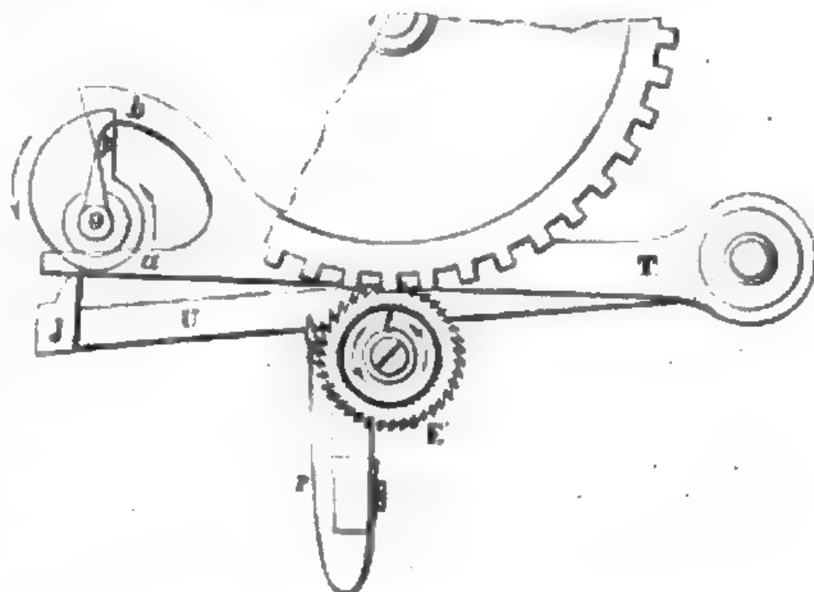


Fig. 529. — Mécanisme de l'impression.

L'axe I porte à son extrémité antérieure située au-dessous de la roue des types une came p (fig. 529) étroite et aiguë qui soulève rapidement le levier ab, mobile autour d'un point fixe à son extrémité T, fait buter le papier contre la roue des types et la lettre qui passe se trouve imprimée. Pour prendre ainsi une lettre au vol sur une roue qui ne s'arrête pas, il est indispensable d'opérer très-rapidement : c'est pour cela que le ressort de l'électro-aimant a une grande force et que la came p est très-aiguë. Le mouvement du

levier qui produit l'impression soulève la pièce J U munie d'un ressort *r* dont l'extrémité glisse le long des dents d'une roue à rochet E, fait tourner celle-ci dans son mouvement descendant, et produit un déplacement du papier correspondant à l'espacement des lettres. Quant à l'espacement des mots, on le produit à l'aide du blanc de la roue des types.

La roue des types doit pouvoir être facilement déplacée pour la correction des erreurs et pour rétablir la concordance avec le chariot lorsque cette concordance a été troublée; c'est pour cela que l'axe G est creux, et la solidarité avec la partie intérieure n'est due qu'à l'action du cliquet *m*. Cette solidarité s'établit par l'action d'un courant venant dans un sens ou dans l'autre et se maintient indéfiniment. Mais si l'on appuie sur la pièce Q (fig. 527), le cliquet *m* est soulevé par E, la solidarité cesse, et par l'action d'une goupille qui vient s'engager dans une encoche correspondante la roue des types s'arrête; cet arrêt correspond au blanc. L'embrayage peut d'ailleurs se produire directement à la main.

Enfin, l'axe I porte une troisième came qui, à chaque révolution de cet axe, passe entre les dents d'une roue T' largement dentée fixée au même axe que la roue des types, et fait avancer et reculer cette roue sans rompre sa liaison avec le rouage moteur; les petits écarts qui pourraient se produire entre le chariot et la roue des types sont ainsi corrigés toutes les fois qu'une lettre s'imprime.

Il résulte de la description qui précède que, la roue des types d'un appareil étant au repos, le blanc en face du papier, si on produit une émission de courant, l'embrayage de l'axe des types a lieu immédiatement, et le papier est porté sur le blanc. Aux émissions suivantes les lettres correspondantes aux touches mises en mouvement seront imprimées par l'appareil même. Mais il en sera de même à l'appareil qui est à l'extrémité de la ligne si les roues qui ont commencé à marcher au même moment marchent exactement d'accord. C'est sur cette concordance qu'est fondée en réalité l'appareil Hughes, et il est possible de l'établir d'une manière rigoureuse. On commence par s'assurer qu'en agissant successivement sur la même touche on envoie la même lettre, A par exemple. Si des lettres différentes s'impriment à l'arrivée, c'est que les hor-

loges ne sont pas d'accord ; on fait varier alors le contre-poids de la lame vibrante jusqu'à ce que l'accord soit établi. Cela fait, les roues des types sont amenées au blanc par le mécanisme indiqué plus haut et les appareils sont prêts à fonctionner.

592. Télégraphes électro-chimiques.—Imaginons un cylindre métallique en communication permanente avec la terre, supposons-le en mouvement et entraînant avec lui, sur sa surface, une bande de papier imprégnée fraîchement de cyanure de potassium. Concevons en outre une pointe très-légère en communication avec le fil de la ligne et s'appuyant constamment sur le papier. Chaque fois qu'on lancera un courant dans la ligne, il y aura une réaction chimique au contact de la pointe d'acier et de la feuille de papier, formation de bleu de prusse et, par conséquent, production d'un trait bleu plus ou moins long suivant la durée du courant. Tel est le principe du télégraphe électro-chimique de M. Bain ; les signaux et le manipulateur sont les mêmes que pour l'appareil Morse. Il ne faut pas que le papier soit trop humide, ce qui donnerait lieu à l'extension des traits et à des signes indéchiffrables; il ne faut pas non plus qu'il soit trop sec, la décomposition chimique n'aurait plus lieu.

593. Télégraphe autographique de Caselli. — Le papier chimique de M. Bain est utilisé dans le télégraphe autographique de Caselli, lequel transmet un fac-simile de la dépêche écrite par l'expéditeur. Voici le principe de ce curieux appareil : A la station de départ on dispose, sur une surface cylindrique M (fig. 530), une feuille de papier métallisée sur laquelle la dépêche est écrite en encre grasse ; à la station d'arrivée, et sur une surface cylindrique pareille R, on dispose une feuille de papier imprégnée de cyanure de potassium. Deux styles, mis en mouvement par des pendules qui oscillent avec un synchronisme

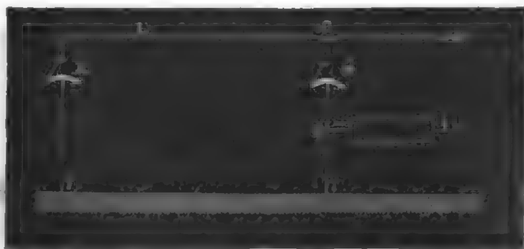


Fig. 530. — Principe du télégraphe Caselli.

rigoureux, s'appuient sur les feuilles en décrivant des traits parallèles, équidistants et très-rapprochés; ces styles sont en communication permanente avec le fil de ligne. Le courant de la station de

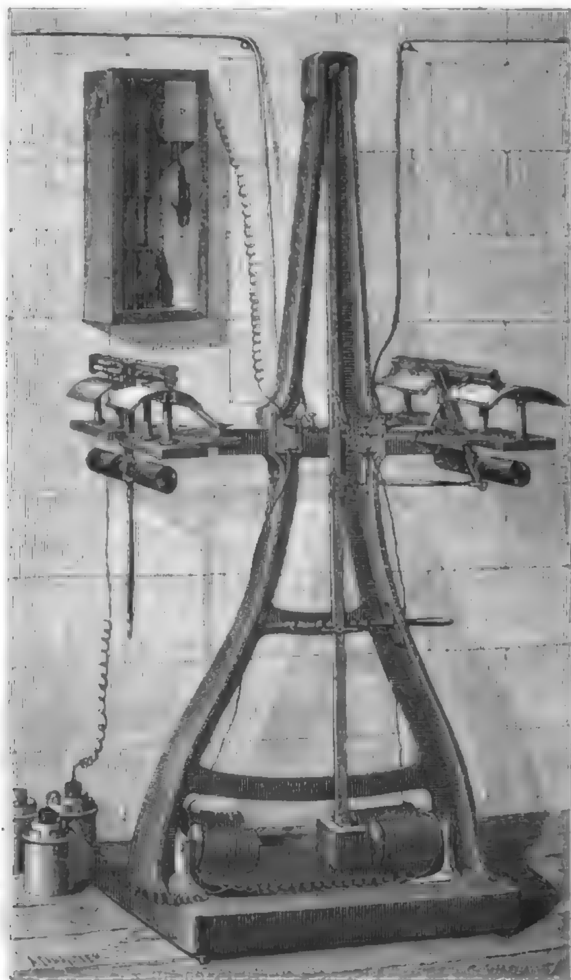


Fig. 531. — Télégraphe Caselli.

départ est fourni par la pile P. Lorsque le style se trouve sur une partie conductrice du papier M, le courant circule en entier dans la partie ABCD et ne va point sur la ligne où la résistance est beaucoup plus considérable. Au contraire, lorsque le style est sur l'encre grasse qui forme les traits de la dépêche, le circuit ABCD

est rompu en M et le courant s'élance sur la ligne. A ce moment, le style de la feuille R est exactement au même point que celui de la feuille M à cause du synchronisme des pendules, et il s'y formera un trait bleu qui est la reproduction exacte du trait de la dépêche traversé par le style. Lorsque, par conséquent, le style de M aura décrit une série de lignes rapprochées et couvrant la feuille, il se sera produit en R une série de points ou de traits dont l'ensemble constituera une reproduction de la dépêche. La pointe traçante est portée par un levier mobile autour d'un axe qui passe à une petite distance de son extrémité inférieure; à cette extrémité s'articule un levier articulé d'autre part au pendule (fig. 531). Pour une oscillation complète du pendule, la pointe traçante décrit sur le cylindre une ligne de gauche à droite; à l'extrémité de la course, le curseur qui porte la pointe vient choquer un butoir, ce choc fait tourner le système d'une petite quantité autour d'une vis, la pointe est soulevée pendant le mouvement de retour et ne retombe qu'à l'origine de la seconde ligne qui se trouve ainsi à une petite distance de la première. Le synchronisme des pendules est la condition nécessaire du fonctionnement de l'appareil; on l'obtient à l'aide de deux horloges que l'on règle séparément à une marche donnée et dont les oscillations sont deux fois plus rapides que celles du pendule télégraphique. La partie terminale de ce dernier est formée par une masse de fer de part et d'autre de laquelle se trouvent deux électro-aimants qui peuvent être animés par le courant d'une petite pile locale. Quand le pendule oscille vers la gauche, le circuit se ferme de ce côté et la masse terminale est attirée; mais le pendule de l'horloge vient à son tour rompre le circuit, le pendule se meut en sens contraire et éprouve, à l'extrémité de son excursion, les mêmes effets en sens contraire.

Il est évident que ce n'est pas seulement des lettres qu'on pourra reproduire par le télégraphe Caselli, mais un dessin quelconque : de là le nom de *pantélégraphe* que reçoit cet appareil. La figure 532 représente une dépêche obtenue sur le papier imprégné de cyanure; la figure 533 est un double de la première, fourni par une feuille d'étain que l'on place ordinairement au-dessous de la feuille de papier; au moment du passage du courant l'humi-

dité du papier est décomposée, l'hydrogène réduit, en face des points où le courant a passé, l'oxyde d'étain qui se trouve toujours en petite quantité sur la surface. Si on traite alors la feuille d'étain



Fig. 532. — Fac-simile d'une dépêche



Fig. 533. — Dépêche sur la feuille d'étain.

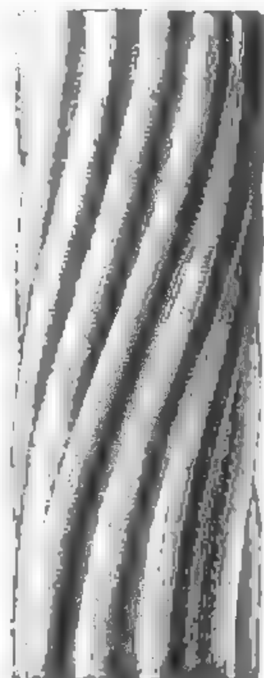
par un mélange d'acide azotique et d'acide pyrogallique, les traits apparaissent en noir.

Le télégraphe Caselli fonctionne depuis quelques années sur les lignes du Havre et de Lyon, il n'a pas donné d'aussi bons résultats qu'on en espérait et bien souvent les dépêches sont indéchiffrables. Cette circonstance ne se produisant pas quand les deux appareils sont placés à côté l'un de l'autre, on doit en conclure que la difficulté qui provient de l'état variable du courant sur la ligne n'est pas encore complétement résolue. La question continue à être étudiée; elle a fait un grand pas par la disposition due à M. Meyer.

594. Télégraphe Meyer. — Dans le télégraphe Meyer, la dépêche écrite, comme pour le Caselli, est enroulée entièrement à la surface d'un cylindre sur lequel un style métallique décrit une spirale à tours très-rapprochés; ce mouvement est produit par un rouage moteur régularisé par une lame vibrante, comme celui du télégraphe Hugues. A chaque fois que le style traverse un trait de la dépêche, le courant est interrompu dans la ligne. A la station d'arrivée est un cylindre pareil et animé d'un mouvement de rotation identique à celui de la station de départ. Sur ce cylindre est disposé un tour d'hélice saillant et occupant toute sa longueur; il suit de là que pendant une révolution les différents points de cette hélice viennent occuper successivement toutes les places possibles sur la génératrice inférieure. Or, pendant que le style traceur fait un tour, il interrompt successivement le courant autant de fois qu'il

coupe les traits de la dépêche ; à chacune de ces interruptions, un papier placé au-dessous du cylindre d'arrivée est soulevé par l'action d'une palette et reçoit une impression due à l'encre grasse ordinaire que l'on entretient toujours à la surface du filet d'hélice. Il y aura donc sur la largeur du papier une ligne formée d'une série de traits équivalents à ceux qui ont été traversés par le style traceur. Mais le papier se déplace continuellement sous le cylindre, à une première ligne de traits succédera une seconde et ainsi de suite ; la juxtaposition de ces diverses lignes donnera donc une dépêche à l'encre grasse qui sera le fac-simile exact de la dépêche de départ, si la longueur du cylindre récepteur ou le pas de l'hélice imprimant a la même étendue que la circonférence du cylindre transmetteur.

595. Télégraphie sous-marine. — La télégraphie sous-marine paraît être définitivement fondée après de longues épreuves. Le premier câble, jeté par M. Brette entre Douvres et Calais, le 28 août 1850, ne vécut que quelques heures ; les deux câbles transatlantiques immergés en 1866 ne paraissent pas avoir subi, jusqu'à l'heure présente, d'avarie sérieuse.



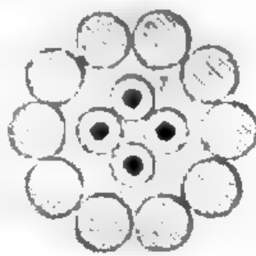


Fig. 534. — Câble sous-marin.

Les difficultés que l'on rencontre dans l'exécution des lignes sous-marines sont très-diverses, l'une des plus importantes se rapporte à la fabrication de câbles suffisamment résistants et isolés. Ils sont composés généralement aujourd'hui (fig. 534) de fils de cuivre en plus ou moins grand nombre, noyés dans la gutta-percha, entourée elle-même d'une couche épaisse de filin goudronné ; à l'extérieur, la masse est protégée par des fils de fer légèrement tordus à la façon des brins extérieurs d'un câble ordinaire. Le câble transatlantique est formé d'un conducteur central composé de sept brins de cuivre assemblés en cordelette et recouverts de trois couches de gutta-percha ; le tout forme un cylindre de 15 millimètres de diamètre. Une seconde enveloppe est constituée par cinq cordes de chanvre imprégnées d'une composition de $\frac{5}{12}$ de goudron de Stockholm, $\frac{5}{12}$ de poix, $\frac{1}{12}$

d'huile de lin et $\frac{1}{12}$ de cire, enfin le tout est protégé par un revêtement de dix-huit cordelettes de fer au bois, composées chacune de sept fils de $\frac{7}{10}$ de millimètre de diamètre. Au sortir de la machine qui l'avait recouvert de son armature en fer, le câble fut passé à travers une chaudière contenant un mélange à chaud de poix, de goudron et d'huile de lin.

Une seconde difficulté tient à l'action inductrice de l'eau environnante; cet effet, déjà signalé dans les lignes souterraines d'une médiocre étendue, prend dans les câbles sous-marins un développement immense. Le câble forme comme un vaste condensateur dont le conducteur central constitue l'armure intérieure et l'eau de mer l'armure extérieure. Dans le câble transatlantique le ralentissement qui en résulte est tellement considérable que les moyens de transmission ordinaires sont impraticables et arrivent difficilement à une vitesse de transmission qui est à peine le $\frac{1}{5}$ de celle des lignes terrestres. Entre deux signaux consécutifs, le fil doit être déchargé, on le met à cet effet en communication avec le sol ou mieux avec le second pôle de la pile, ce qui produit un effet inverse qui détruit rapidement le premier et le fil est rendu libre pour une seconde transmission.

Le récepteur employé doit avoir une très-grande sensibilité, c'est le galvanomètre de M. Thompson. Dans cet appareil, chacune des aiguilles est munie d'un multiplicateur spécial; l'une d'elles est mastiquée au dos d'un miroir légèrement concave que soutient un fil de coton. On fait tomber sur le miroir la lumière d'une lampe passant à travers une fente; on obtient ainsi une image renversée sur un écran placé au centre de courbure du miroir et près de la fente elle-même. La combinaison des déviations dans un sens et dans l'autre donne lieu à un système alphabétique analogue à celui du télégraphe anglais à aiguilles.

CHAPITRE LI.

ÉLECTRO-CHIMIE.

596. Électrolysation. — Lorsqu'on fait passer un courant à travers un corps composé, celui-ci se sépare en deux éléments différents qui apparaissent aux extrémités polaires, c'est-à-dire sur les électrodes métalliques par lesquelles le courant pénètre dans le corps. Cette séparation du corps en deux éléments s'appelle *électrolyse* ou *électrolysation;* on la considère comme liée essentiellement à la propagation du courant dont elle serait la manifestation directe, de telle façon que le passage du courant à travers un corps composé conducteur sans décomposition paraît absolument inadmissible.

On nomme électrolytes les corps soumis à la décomposition, et quelquefois aussi les éléments de cette décomposition elle-même. On peut prendre pour type de ce genre de phénomènes la décomposition de l'eau par la pile; elle s'effectue dans des appareils appelés voltamètres.

Le voltamètre (fig. 535) se compose d'un vase en verre dont le fond est formé par une matière isolante. Deux fils de platine traversent ce fond et peuvent être mis en rapport à l'extérieur avec les deux rhéophores d'une pile. On met de l'eau acidulée dans le vase et au-dessus de chacun des fils on dispose deux éprouvettes remplies également d'eau acidulée. Si l'on fait passer le courant, on voit immédiatement des bulles de gaz se former et se dégager sur les pointes de platine. A la pointe positive se dégage de l'oxygène, et de l'hydrogène à la pointe négative. Au bout de quelque temps une

certaine quantité de gaz s'est réunie dans les éprouvettes, et l'on peut constater que le volume de l'hydrogène est à peu près double de celui de l'oxygène.

Il est à remarquer que cette expérience ne réussit qu'avec de

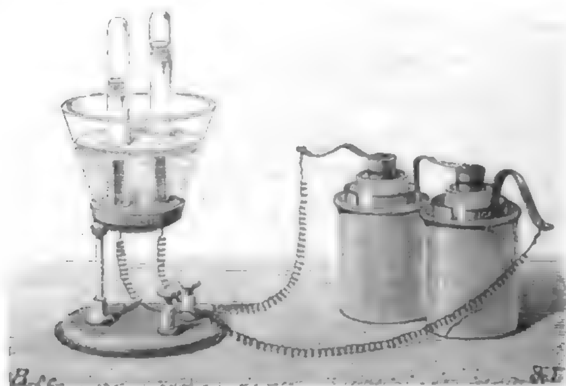


Fig. 535. — Voltamètre.

l'eau rendue conductrice par une petite quantité d'acide ; l'eau pure a un pouvoir conducteur si faible que son électrolysation est extrêmement difficile, si tant est qu'elle soit possible.

597. Transport des éléments. — Les éléments mis en liberté par l'électrolysation apparaissent exclusivement sur les extrémités polaires et on ne les voit jamais sur les points intermédiaires ; cette circonstance s'explique aisément en admettant que le courant produit, en même temps que la décomposition, le transport des éléments séparés. Les uns, comme l'hydrogène et les métaux, suivent le chemin de l'électricité positive, on les appelle éléments *électro-positifs ;* les autres suivent le chemin de l'électricité négative, on les appelle éléments *électro-négatifs.*

Considérons d'après cela une file de molécules d'eau, par exemple, située entre deux électrodes, l'une positive, située à gauche de la figure 536, l'autre négative, située à droite. Par le fait de l'électrolysation, toutes les molécules de la file sont décomposées ; il se produit un double courant d'hydrogène vers la droite de la figure, et d'oxygène vers la gauche. Par suite de ce mouvement, il y a entre les électrodes une rencontre continuelle des molécules

d'oxygène et d'hydrogène et une reformation également continue d'eau. Ainsi l'hydrogène de la molécule 1 se combine avec l'oxygène de la molécule 2 pour former une nouvelle molécule 1′; l'hydrogène de la molécule 2 se combine avec l'oxygène de la molécule 3 pour former une nouvelle molécule 2′, etc. A l'électrode positive se dégage l'oxygène de la molécule 1, à l'électrode négative l'hydrogène de la molécule 6. Il se forme ainsi la nouvelle file de molécules 1′, 2′, 3′, etc., qui éprouve le même phénomène d'électrolyse et ainsi de suite. Cette théorie de l'électrolysation est due au physicien suédois Grothuss.

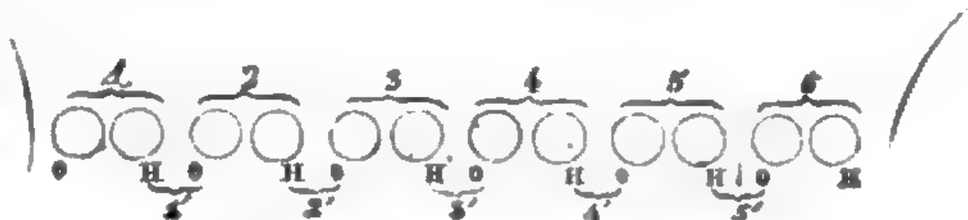


Fig. 536. — Théorie de Grothuss.

598. Électrolyse des composés binaires. — Lorsqu'on soumet à l'électrolyse un composé binaire, dont un des éléments est métallique, le métal se rend toujours au pôle négatif, c'est-à-dire qu'il est toujours électro-positif. Cette observation a permis d'appliquer l'électrolyse à la préparation d'un certain nombre de métaux : c'est ainsi que Davy a obtenu les métaux alcalins en décomposant par la pile les alcalis correspondants. Pour le potassium il se servait d'une plaque de potasse humectée d'eau pour la rendre conductrice, dans laquelle il pratiquait une cavité qui était remplie de mercure. Le rhéophore négatif de la pile aboutissait au mercure, tandis que le rhéophore positif était mis en communication avec la plaque de potasse. Par l'effet du courant, le potassium se rend au pôle positif, s'amalgame avec le mercure et se trouve ainsi soustrait, au moins partiellement, à l'action de l'air et de l'eau qui l'auraient de nouveau oxydé.

Les oxydes terreux, tels que la magnésie, l'alumine, sont plus résistants que la potasse et la soude et n'ont pu être électrolysés, mais on a réussi à décomposer les chlorures d'aluminium et de magnésium et à préparer ainsi les métaux par voie électrolytique.

On prend, par exemple, du chlorure de magnésium que l'on fait fondre en le portant au rouge dans un creuset de porcelaine. Une cloison poreuse divise la partie supérieure de celui-ci en deux compartiments; dans l'un plonge une lame de charbon devant servir d'électrode positive, et dans l'autre une lame de même substance,

mais munie d'incisions formant des espèces de dents dirigées de haut en bas et destinées à retenir le métal dont le poids spécifique est plus petit que celui du chlorure. C'est par le courant électrique que M. Deville a, en 1854, préparé l'aluminium qui a montré des propriétés si imprévues et si intéressantes.

Pour l'électrolysation des composés binaires solubles dans l'eau on se sert souvent de leurs dissolutions, mais il convient, en général, de les prendre très-concentrées.

599. Électrolyse des sels. — Si l'on soumet à l'action électrolytique la dissolution d'un sel ordinaire, on reconnaît qu'il y a constamment un dépôt de métal à l'électrode négative ; à l'électrode positive se dégage de l'oxygène et il se produit de l'acide libre. C'est ce qui arrive, par exemple, si l'on plonge deux électrodes en platine dans une dissolution de sulfate de cuivre. Si dans cette expérience l'électrode positive était formée d'un métal oxydable, l'oxygène se combinerait avec lui et on n'observerait aucun dégagement de gaz. Si c'était du cuivre lui-même, l'oxyde de cuivre formé se combinerait avec l'acide et il se reformerait une quantité de sulfate de cuivre identiquement égale à celle qui s'est décomposée. La liqueur resterait donc toujours dans le même état de saturation et le cuivre déposé sur l'électrode négative serait exactement compensé par le métal emprunté à l'électrode positive, qui prend dans ce cas le nom d'*électrode soluble*.

Si on fait l'expérience précédente sur un sel des métaux des premières sections, les résultats ne sont pas les mêmes et ont donné lieu pendant longtemps à une interprétation fautive. Dans le tube que représente la figure 537 on place du sulfate de soude en dissolution, liquide complétement neutre aux papiers réactifs et on le colore avec du sirop de violette. Si l'on fait alors passer le courant, on constate au bout de quelque temps une coloration rouge autour de l'électrode positive et une coloration verte autour de l'électrode négative. On en conclut qu'il y a de l'acide libre au pôle positif et de l'alcali au pôle



Fig. 537. — Décomposition des sels.

négatif. On reconnaît d'ailleurs qu'il se dégage de l'oxygène au pôle positif et de l'hydrogène au pôle négatif. On a conclu pendant longtemps de cette expérience que dans l'électrolysation des sels l'acide se rend à l'électrode positive, et la base à l'électrode négative. Dans la décomposition d'un sel métallique, comme le sel de cuivre, on supposait une électrolysation ultérieure de l'oxyde de cuivre qui avait pour résultat l'apparition du métal au pôle négatif et de l'oxygène au pôle positif. L'hypothèse de cette double électrolysation successive est assez compliquée et d'ailleurs entièrement gratuite. Elle n'a été faite, en réalité, que dans le but de faire concorder le sens de l'action électrolytique avec les théories chimiques suivant lesquelles un sel est le résultat de la réunion d'un acide et d'une base. Dans le cas du sulfate de soude, la décomposition se fait comme dans tous les autres cas. Au pôle positif il y a formation d'acide libre et d'oxygène, au pôle négatif apparaît le sodium, mais celui-ci décompose l'eau comme tous les métaux de la première section : l'hydrogène provenant de cette décomposition se dégage; quant à l'oxygène, il se combine avec le sodium et forme la soude.

600. Électrolyse de l'eau. — Ce que nous venons de dire des sels s'applique aux oxacides ordinaires. Ainsi, dans la décomposition de l'acide sulfurique étendu (SO^3, HO), l'hydrogène, qui est une sorte de métal gazeux, se dégage au pôle négatif; au pôle positif se dégage l'oxygène, et le corps SO^3 reforme avec l'eau le composé primitif. C'est sans doute de cette façon que se produit ce que l'on appelle l'électrolyse de l'eau. Ce n'est pas en réalité ce liquide très-mauvais conducteur qui est électrolysé, mais bien l'acide, qui se régénère d'ailleurs d'une manière continue. Quoi qu'il en soit, on se sert fréquemment de voltamètres pour mesurer l'intensité des courants; il convient de mesurer de préférence le volume de l'hydrogène, d'abord parce qu'il est plus grand, et surtout parce qu'il est moins soluble. Il est également important de ne pas opérer à une température trop basse. Au-dessous de 20° l'oxygène peut se combiner avec l'eau et former de l'eau oxygénée; celle-ci se répand dans l'appareil et arrive au pôle négatif où elle peut être réduite par une portion correspondante d'hydrogène.

601. Lois de Faraday. — Les phénomènes électrolytiques sont soumis aux lois suivantes, qui ont été énoncées par Faraday.

1° *Le travail chimique effectué par le courant est le même dans tous les points du circuit.*

Que l'on place des voltamètres dans les différents points d'un circuit traversé par un courant, on constatera que le volume d'hydrogène recueilli dans chacun de ces appareils est le même, c'est-à-dire que la quantité d'eau décomposée est la même. Si le courant se dérive quelque part, deux voltamètres placés dans les parties dérivées recueillent des quantités d'hydrogène dont la somme est égale à celle du voltamètre placé dans le courant principal.

2° *La quantité d'électrolyte décomposée dans un temps donné est proportionnelle à l'intensité du courant.*

Il suffit, pour démontrer l'exactitude de cette proposition, de faire circuler un courant à la fois dans une boussole de sinus et dans un voltamètre; on peut observer ainsi l'intensité du courant et le volume d'hydrogène recueilli dans le voltamètre. On modifie ensuite l'intensité du courant en faisant varier, par exemple, la résistance du circuit; on obtient ainsi une nouvelle intensité et le volume d'hydrogène recueilli dans le même temps change aussi; mais le rapport des deux volumes de gaz est exactement égal au rapport des intensités du courant.

3° *Lorsque, dans un circuit, divers électrolytes sont soumis à l'action du courant, les quantités décomposées de chacun d'eux sont proportionnelles à leurs équivalents.*

Cette loi est de beaucoup la plus remarquable, elle nous apprend qu'au travail chimique nécessaire pour séparer des quantités pondérales équivalentes chimiquement, correspond une même intensité électrique, c'est-à-dire une même quantité d'électricité ou encore un même travail électrique. Ainsi, qu'on place dans un même circuit un voltamètre ordinaire, des tubes contenant du chlorure de plomb, du protochlorure d'étain en fusion, de l'azotate d'argent en dissolution concentrée, etc.; en même temps qu'il se dégagera de l'hydrogène, il se déposera sur les surfaces polaires négatives des tubes, du plomb, de l'étain et de l'argent. Or, si l'on représente par 1 le poids de l'hydrogène recueilli, les poids de

plomb, d'étain et d'argent déposés seront 104, 59 et 108, c'est-à-dire les équivalents mêmes des métaux.

Il est essentiel de remarquer que cette loi ne s'applique pas seulement aux électrolytes placés dans le circuit extérieur à la pile, mais aux électrolytes constituant la pile elle-même. Ainsi dans l'expérience précédente un équivalent de zinc aura été dissous dans chacun des éléments de la pile. D'où l'on voit que la quantité d'électricité ou l'intensité électrique est proportionnelle à la fois au travail chimique intérieur de la pile et à son travail extérieur, ce qui établit entre l'action chimique et l'électricité une dépendance des plus étroites. On voit, par conséquent, combien il est important d'étudier la disposition des éléments destinés à former une pile. Supposons, par exemple, qu'on emploie un élément pour produire un effet déterminé, il se dissoudra dans cet élément une quantité de zinc en rapport avec l'intensité du courant. Or, si, pour effectuer la même opération et avec un courant de même intensité, on se sert d'une pile de 5 éléments, la dépense de zinc dans chacun des éléments sera la même que celle qui avait lieu dans l'élément unique; elle sera donc en réalité 5 fois plus forte. Si donc on veut produire une opération déterminée à l'aide d'un courant, il faudra, en général, s'en tenir au nombre strict d'éléments nécessaires pour que l'opération soit possible; au delà de ce nombre, l'accroissement d'intensité produit par l'addition d'un élément peut être plus que compensé par la dépense de zinc dans l'élément nouveau.

602. Polarisation des électrodes. — Lorsque des électrodes ont servi pendant longtemps à produire la décomposition d'un électrolyte, si l'on vient à les plonger dans un liquide conducteur et à les réunir extérieurement par un fil, on constate la production d'un courant de sens contraire à celui du courant primitif.

Ainsi, par exemple, supposons que la pile de Bunsen M (fig. 538) ait servi à produire la décomposition du sulfate de potasse à l'aide des électrodes A et B, A étant l'électrode positive et B l'électrode négative, le courant va dans le vase à décomposition de A à B; supprimons maintenant la pile et réunissons les électrodes par le fil N, il se produira un courant dirigé de B vers A. On peut expliquer la

production de ce courant de la manière suivante : Pendant l'acte de l'électrolysation, de la potasse s'accumule sur l'électrode B et de l'acide sulfurique sur l'électrode A; or ces éléments peuvent réagir ensuite l'un sur l'autre par l'intermédiaire du liquide : il doit se

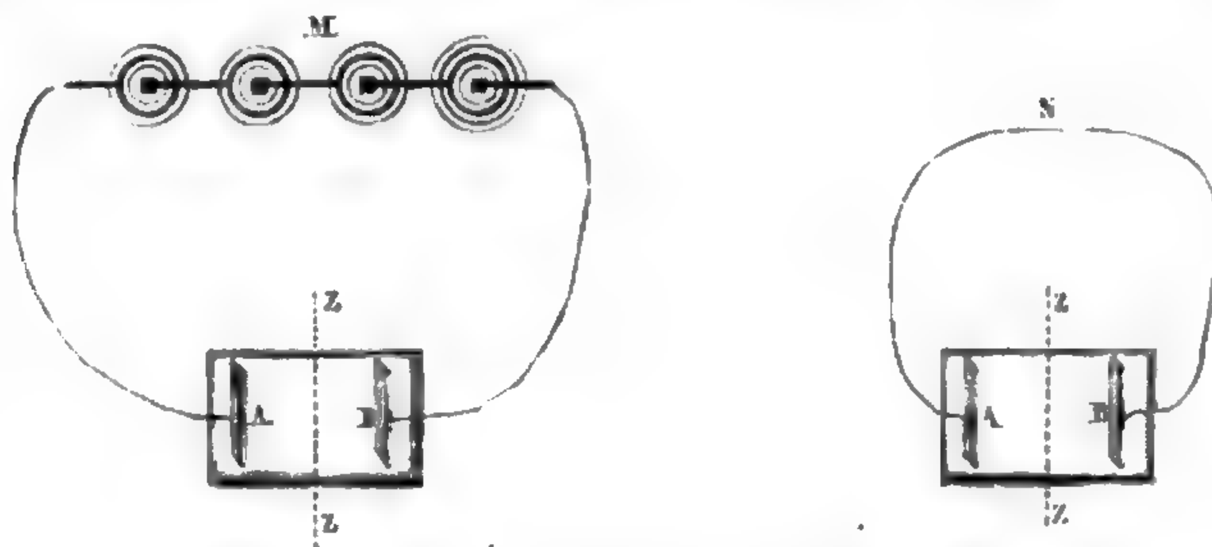


Fig. 538. — Polarisation des électrodes.

produire. sur une certaine surface ZZ, à peu près à égale distance des électrodes, une combinaison de l'acide et de l'alcali qui donne lieu à un courant dirigé de B vers A. Ce phénomène a reçu le nom de *polarisation des électrodes.* On a quelquefois utilisé le courant qui en résulte sous le nom de *courant secondaire,* mais le plus ordinairement il intervient d'une manière fâcheuse pour affaiblir l'intensité du courant de la pile. Il se produit en effet, pendant l'électrolysation elle-même, non-seulement dans le vase extérieur, mais aussi dans chacun des éléments de la pile, et donne lieu à un courant inverse qui diminue celui de la pile. C'est une des causes principales de l'affaiblissement du courant dans les piles à un liquide. Il y a des piles qui se polarisent plus fortement et plus vite que d'autres; c'est ce qui a lieu, par exemple, dans la pile au bichromate de potasse décrite plus haut (522). La présence d'un diaphragme poreux atténue notablement les effets de la polarisation dans les piles à deux liquides.

603. Dissociation électrique. — L'électrolysation est une chose inhérente à la propagation du courant; quelque faible que soit l'intensité de ce dernier, elle a toujours lieu, et il n'y a d'autres différences que dans la vitesse de décomposition. *Du moment que le courant passe, l'électrolysation a lieu.* Cette circonstance a une analogie remarquable avec les phénomènes auxquels M. Deville a

donné le nom de *dissociation*. Ils consistent dans des décompositions produites par la chaleur à une température inférieure à laquelle a lieu la décomposition complète et pour ainsi dire à toute température. Cette dissociation augmente d'intensité avec la température jusqu'au moment où celle-ci a atteint le degré nécessaire pour que la décomposition soit complète.

604. Applications électro-chimiques. — Les applications de l'électro-chimie sont nombreuses et importantes. « Docile à la main de l'homme, l'électricité apprend à donner aux métaux la forme et la cohésion ; elle recouvre d'or et d'argent des matières moins précieuses, et en étendant ainsi l'usage des métaux non oxydables, elle fait pénétrer un luxe de bon aloi jusque dans les plus modestes demeures.

« C'est elle qui a revêtu d'une couche de cuivre protectrice les candélabres de la ville de Paris et les grandes fontaines des places Louvois et de la Concorde. L'électricité rivalise avec les ciseleurs les plus habiles par la délicatesse et le fini de ses ornements ; elle copie avec une fidélité merveilleuse les gravures sur bois ou sur acier, et ses planches de cuivre, qui supportent jusqu'à quatre-vingt mille tirages, peuvent se renouveler, pour ainsi dire, indéfiniment, sans que le type primitif soit altéré.

« De ses doigts invisibles l'électricité moule, pour la nouvelle salle de l'Opéra, des chapiteaux et des statues dont le cuivre n'a pas connu le fourneau du fondeur.

« Elle a fait les portes de l'église Saint-Augustin ; elle a élevé la nouvelle colonne Trajane, dont les bas-reliefs de cuivre galvanique reproduisent, avec une rare perfection, le monument de l'art antique [1]. »

Nous allons décrire le principe de quelques-unes de ces opérations.

605. Dorure et argenture galvaniques. — Le dépôt d'une couche d'or ou d'argent à la surface d'un autre métal moins précieux n'est autre chose que l'expérience de l'électrolysation d'un sel

1. Quet, *Rapport sur les progrès de l'électricité, du magnétisme et de la capillarité*. Chez L. Hachette et Ce, Paris.

décrite au § 599. Quel que soit le métal entrant dans la dissolution, il vient toujours se déposer sur l'électrode négative; il suffit donc de former celle-ci par l'objet même que l'on veut recouvrir de métal. Toute la question industrielle revient à choisir la nature de la dissolution, de telle façon que le dépôt soit solide et adhérent. Les brevets de MM. Ruolz et Elkington, exploités pendant longtemps en France par la maison Christofle, réalisent parfaitement ces conditions pratiques.

Les dissolutions sont toujours alcalines et ordinairement formées du cyanure ou du chlorure métallique dissous dans un cyanure alcalin.

Pour faire le *bain d'or* on fait dissoudre 50 grammes d'or *fin* dans l'eau régale, on évapore, et, quand la liqueur est arrivée à la consistance sirupeuse, on ajoute de l'eau et 50 grammes de cyanure de potassium, on fait bouillir et on prépare, avec les quantités indiquées, 50 litres de dissolution.

On forme l'électrode négative avec la pièce à dorer; l'électrode positive est une lame d'or fin qui constitue une électrode soluble; de cette façon la liqueur conserve toujours le même titre. Il est convenable, pour obtenir une dorure de bonne qualité, de maintenir le bain, pendant l'opération, à une température de 60 à 70°.

La figure 539 représente l'appareil dont on se sert souvent pour

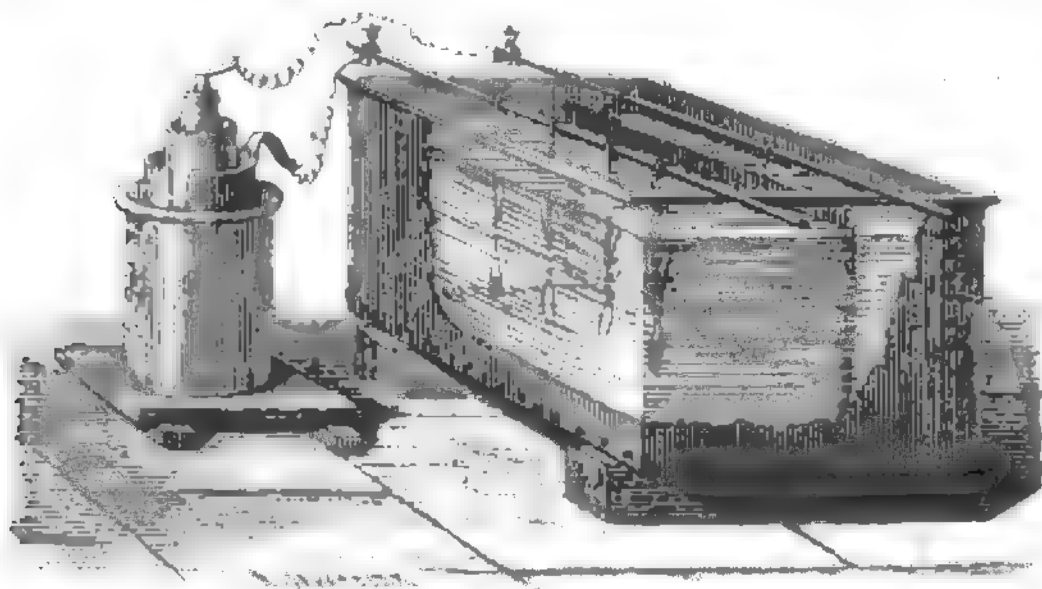


Fig. 539. — Appareil composé pour la dorure.

la dorure. Les pôles de la pile aboutissent à deux tringles posées sur la cuve qui renferme le bain; à la tringle négative sont suspendus les objets à dorer, et à la tringle positive une lame d'or fin dont les

dimensions doivent être en rapport avec la surface totale des objets placés à l'électrode négative.

Le bain d'argent est formé par une dissolution faite dans les proportions de 2 parties de cyanure d'argent, 10 parties de cyanure de potassium et 250 parties d'eau. L'opération est identique à celle de la dorure, seulement les appareils sont généralement plus grands, et l'on peut sans inconvénient opérer à froid.

Ajoutons que, pour que le dépôt galvanique puisse se faire convenablement à la surface des pièces, il faut que celles-ci soient préalablement dépouillées de la matière grasse qui les recouvre; c'est l'objet du décapage et du dérochage, opérations techniques sur lesquelles nous n'avons pas à insister.

Ce n'est pas seulement à la surface d'un métal qu'on peut effectuer un dépôt galvanique, mais à la surface d'une substance quelconque, pourvu qu'on ait le soin de rendre celle-ci conductrice; on peut ainsi dorer ou argenter des corbeilles, des fruits, des fleurs, etc. Le procédé s'applique d'ailleurs à un métal quelconque et ce qui vient d'être dit suffit pour comprendre les opérations du cuivrage, du platinage, etc.

606. Électrotypie. — L'électrotypie consiste dans la reproduction galvanique en cuivre d'une médaille, d'une planche gravée, etc. Les premiers essais datent de 1827; ils sont dus à M. Jacobi, à Saint-Pétersbourg, et M. Spencer, à Londres; cet art a pris aujourd'hui une très-grande extension.

Supposons, par exemple, qu'on veuille reproduire une médaille : on commence par en prendre un moule exact en creux; on se sert pour cela soit d'alliage fusible, soit de plâtre, soit surtout de gutta-percha ramollie à 100°. Le moule en alliage est conducteur par lui-même, il n'en est pas de même des autres, et il faut, dans ce cas, en métalliser la surface en la frottant avec de la plombagine. Le moule ainsi préparé est disposé comme électrode négative dans un bain de sulfate de cuivre, tandis que l'électrode positive est formée par une lame de même métal; il est clair que si le courant passe, le cuivre se déposera sur les parties creuses du moule et formera ainsi une lame qui, détachée, reproduira, sur sa surface en contact avec le moule, la face même de la médaille; on pourra faire

une opération analogue sur la face opposée et obtenir ainsi un facsimile complet.

Très-fréquemment, dans les opérations de ce genre, on se sert d'un appareil simple où l'électricité est produite dans le bain lui-même; la figure 540 en représente la disposition.

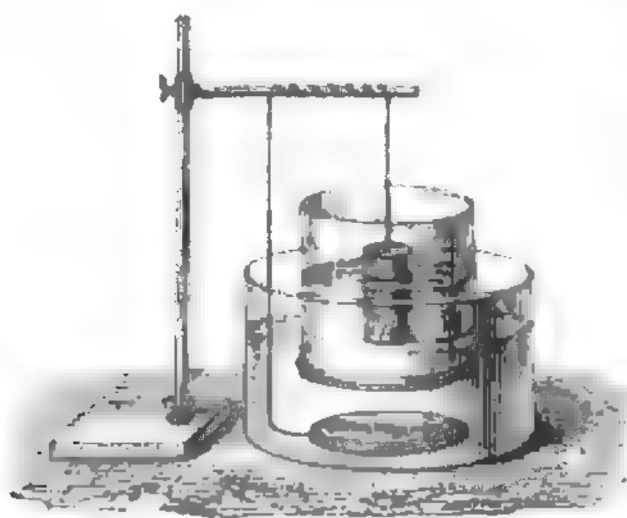


Fig. 540. — Appareil simple pour l'électrotypie.

Dans l'intérieur d'un vase contenant une dissolution saturée de sulfate de cuivre, on dispose, en le soutenant convenablement, un deuxième vase en terre poreuse ou simplement un vase de verre fermé inférieurement par une membrane; dans ce second vase on place de l'eau acidulée et un petit cylindre de zinc. Dans le vase extérieur, le moule est disposé exactement au-dessous et en regard du fond du vase poreux. Le cylindre de zinc et le moule sont fixés à une tringle en laiton qui établit entre eux une communication électrique. Cet appareil n'est autre chose qu'un élément de Daniell dont les deux pôles sont réunis; il est donc traversé d'une manière continue par un courant qui va du zinc au cuivre. Le métal transporté dans le sens même du courant (597) est arrêté par le moule et se dépose sur sa surface.

Dans cet appareil simple, la liqueur ne reste pas au même titre ainsi que cela a lieu dans l'appareil composé à électrode soluble, elle s'appauvrit graduellement. On remédie à cet inconvénient en disposant dans son intérieur, à l'aide d'un vase percé de trous, des cristaux de sulfate de cuivre qui, se dissolvant graduellement, maintiennent la saturation du liquide.

607. Applications diverses de l'électrotypie. — Parmi les applications de l'électrotypie, nous citerons celle qui se rapporte à l'impression des vignettes. Les bois gravés, qui constituent le travail primitif du dessinateur et du graveur, ne sauraient supporter un tirage un peu considérable sans s'altérer ou même s'écraser, de sorte qu'après quelques milliers d'exemplaires le bois serait perdu et devrait être refait. Aussi ce n'est point avec lui que se fait l'im-

pression, mais avec une reproduction galvanique en cuivre, appelée *cliché*, que l'on obtient par un moulage à la gutta-percha. Le cuivrage ne dure que vingt-quatre heures, ce qui fournit une lame de cuivre très-mince, mais on la renforce en coulant sur son revers de l'alliage des caractères d'imprimerie. C'est par ce moyen que sont tirées les vignettes des ouvrages illustrés de toute nature, si répandus aujourd'hui. Un cliché galvanique peut supporter un tirage de 80,000 exemplaires. C'est également par le clichage qu'on obtient, à l'aide d'un type unique, les planches servant au tirage des timbres-poste et dont la conformité absolue avec l'original est rigoureusement nécessaire pour dérouter tous les essais de contrefaçon. Le tirage est ici extrêmement actif, aussi les planches doivent-elles être souvent renouvelées, mais les opérations nécessaires pour cela n'altèrent pas sensiblement le type primitif.

C'est par l'emploi d'un appareil *simple*, mais de très-grandes dimensions, que les candélabres de gaz de la ville de Paris sont recouverts d'une couche de cuivre galvanique. Le corps des candélabres est en fonte, mais ce n'est pas sur la fonte elle-même qu'on produit le dépôt, et voici pourquoi : Si, le cuivrage étant opéré, il venait à se produire quelque part une solution de continuité, le cuivre et la fonte formeraient un couple voltaïque dont le pôle positif serait formé par la fonte ; l'oxydation de l'air serait singulièrement favorisée par cette influence galvanique et ferait de très-rapides progrès [1].

Pour échapper à cet inconvénient, on commence par recouvrir la pièce à cuivrer d'un enduit de minium, qu'on recouvre, quand il est sec, d'une couche de plombagine très-fine pour rendre la surface conductrice ; c'est sur cette couche qu'on dépose le cuivre.

1. C'est un phénomène de ce genre qui se produit dans le fer-blanc, qui n'est autre chose que de la tôle recouverte d'étain. Tant que l'étain est intact, le fer est préservé de l'oxydation ; mais s'il vient à se produire une solution de continuité, le fer devient le pôle positif du couple et l'oxydation est très-rapide. Cet inconvénient ne se rencontre pas dans le fer recouvert de zinc que l'on appelle *fer galvanisé*. En effet, c'est ici le zinc qui devient le pôle positif du couple et qui s'oxyde, mais son oxyde, assez adhérent au métal, forme bientôt une couche qui met les parties intérieures à l'abri d'une oxydation nouvelle.

CHAPITRE LII.

INDUCTION.

608. Courants d'induction. — On désigne sous le nom de *courants d'induction* des courants produits par l'influence de courants ou d'aimants voisins; c'est Faraday qui les fit connaître dans le courant de l'année 1831 et cette découverte est incontestablement l'une des plus brillantes de la physique moderne. Ampère paraît avoir réussi à exciter un courant dans un conducteur par l'action d'un courant voisin[1], mais ses expériences, en tout cas, n'ont pas été complètes, elles n'ont donné lieu à aucune recherche sur la loi physique d'un phénomène aussi important, et par conséquent elles sont restées sans influence sur les travaux de Faraday, dont la découverte reste entière. Cette conclusion paraîtra d'autant plus certaine que Faraday n'a réussi à mettre en évidence les courants d'induction qu'en se plaçant dans des conditions physiques spéciales et auxquelles Ampère n'avait nullement songé. Ce n'est pas, en effet, pendant qu'un courant circule avec une intensité déterminée dans un fil conducteur que se produit l'influence dans un circuit voisin, c'est seulement quand il prend naissance ou quand il cesse, ou bien encore quand il éprouve une variation d'intensité. Ce sont là les conditions spéciales de l'induction et c'est incontestablement Faraday qui les a fait connaître.

609. Induction produite par la naissance ou la cessation d'un courant. — Concevons une bobine B (fig. 541) sur laquelle se

1. *Rapport* de M. Quet, page 96.

trouvent enroulés, parallèlement l'un à l'autre, deux fils; l'un communique par ses extrémités avec le galvanomètre G; les extrémités de l'autre plongent dans les godets g et g' où viennent aussi aboutir les rhéophores de l'élément de pile P. Tant que le courant passe

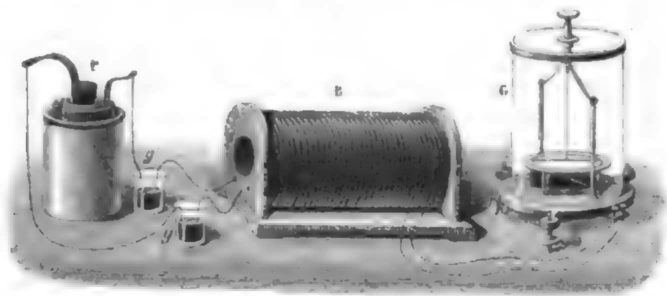


Fig. 541. — Induction produite par la naissance ou la cessation d'un courant.

dans le second fil, l'aiguille du galvanomètre reste immobile; mais si on vient à l'interrompre en soulevant un des fils qui plongent dans les godets, au moment de cette interruption il y a une déviation qui accuse l'existence d'un courant dont le sens est le même que celui du courant inducteur; ce courant est pour ainsi dire instantané et l'aiguille ne tarde pas à revenir à sa position initiale. Si alors on rétablit le courant, il y a une déviation inverse, c'est-à-dire production d'un courant d'un sens contraire à celui du courant inducteur. Ce courant est instantané comme l'autre, et, au bout de quelques oscillations, l'aiguille revient au zéro. On peut donc énoncer la proposition suivante : *Quand un courant commence, il induit dans un fil voisin un courant de même sens ou direct; quand un courant finit, il induit dans un fil voisin un courant de sens contraire ou inverse.*

610. Induction produite par la variation d'intensité d'un courant. — Servons-nous du même appareil; supposons le courant passant par l'un des fils et réunissons les godets par le fil conducteur d (fig. 542); il se produit une dérivation (547) et l'intensité du courant dans la bobine se trouve naturellement diminuée. Supposons l'aiguille du galvanomètre au zéro et soulevons l'une des extrémités du fil de dérivation, le courant de la bobine s'accroît tout à coup et l'aiguille du galvanomètre accuse dans le fil induit la

production d'un courant inverse. Attendons que l'aiguille soit revenue au zéro et rétablissons la dérivation, il se produit dans le fil induit un courant direct; donc *lorsqu'un courant augmente d'intensité, il*

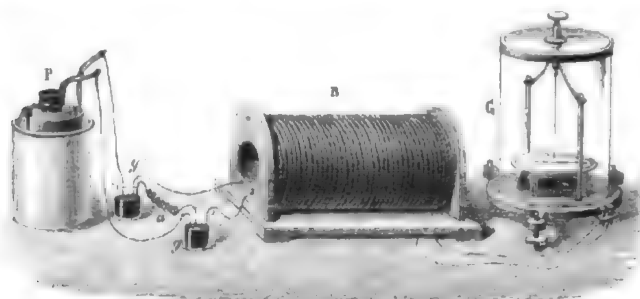


Fig. 542. — Induction produite par la variation d'intensité.

induit dans un fil voisin un courant inverse; lorsque son intensité diminue, il induit un courant direct.

611. Induction produite par la variation de distance. — La variation d'intensité d'un courant peut être obtenue par la variation même de la distance à laquelle il agit. On se sert, par exemple,



Fig. 543. — Induction produite par la variation de distance.

d'une bobine creuse (fig. 543) entourée d'un fil dont les extrémités aboutissent à un galvanomètre; une seconde bobine, dont le fil est traversé par un courant, peut pénétrer dans l'ouverture centrale de la première. Lorsque l'on fait pénétrer cette seconde bobine dans l'intérieur de la première, l'aiguille du galvanomètre accuse la pro-

duction d'un courant inverse; l'aiguille étant revenue au repos, si on retire la bobine intérieure, il se produit dans l'autre un courant direct. Ces courants diffèrent des précédents en ce qu'ils ne sont pas instantanés, ils durent pendant tout le temps que se produit la variation de distance des bobines. On peut donc énoncer cette proposition : *Lorsqu'un conducteur traversé par un courant s'approche d'un conducteur voisin, il y induit un courant inverse; lorsque au contraire il s'en éloigne, il y induit un courant direct.*

612. Induction magnéto-électrique. — Les aimants, n'étant autre chose qu'un système particulier de courants, doivent donner lieu à des phénomènes d'induction analogues aux précédents; la vérification de cette prévision constitue une confirmation nouvelle de la théorie d'Ampère. On peut faire l'expérience de la manière suivante : On se sert d'une bobine creuse (fig. 544) dont le fil est mis en rapport par ses extrémités f et f' avec un galvanomètre. On dispose en face de l'ouverture de la bobine le pôle boréal de l'aimant AB. Tant que l'aimant conserve la même position par rapport à la bobine, l'aiguille du galvanomètre reste au 0; mais si on vient à l'introduire dans son intérieur, l'aiguille se meut et accuse la production dans la bobine d'un courant inverse de celui qui constitue l'aimant; ce courant persiste pendant toute la durée du mouvement de l'aimant. Lorsque l'aimant s'arrête, l'aiguille revient au repos; si alors on retire l'aimant, la bobine devient le siége d'un courant direct.



Fig. 544. — Induction magnéto-électrique.

On peut faire l'expérience d'une autre manière et le résultat est même beaucoup plus marqué. On place dans l'intérieur de la bobine (fig. 545) un cylindre de fer doux et on approche ou on éloigne de lui un aimant. Sous l'influence de ce dernier le fer doux devient un aimant dont l'intensité est croissante quand l'aimant s'approche et décroissante quand il s'éloigne. Dans le premier cas il se produit dans la bobine un courant inverse et dans le second cas un courant direct. Donc *toutes les fois qu'un aimant se forme ou prend un*

accroissement d'intensité dans le voisinage d'un conducteur, il induit dans ce conducteur un courant inverse; il y a au contraire induction

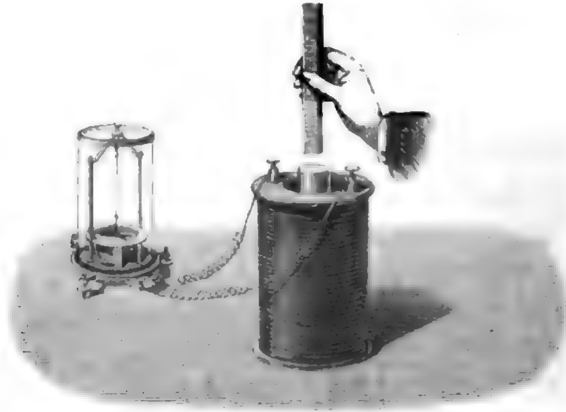


Fig. 515. — Induction par l'aimantation du fer doux.

d'un courant direct quand l'aimant disparaît ou que son intensité diminue.

613. Loi de Lenz. — Le sens des courants d'induction obtenus dans les circonstances précédentes peut s'exprimer d'une manière générale à l'aide de la loi suivante énoncée pour la première fois par M. Lenz, physicien russe : *Lorsqu'un courant est induit par le mouvement relatif d'un conducteur et d'un courant ou d'un aimant, l'action inductrice tend à développer dans chaque élément du conducteur un courant dirigé de telle façon que son action électro-dynamique sur le courant ou sur l'aimant inducteur tend à produire un mouvement contraire au mouvement réel.*

Ainsi, par exemple, quand un fil conducteur traversé par un courant s'approche d'un autre fil, il y induit un courant inverse. Or l'action de ce courant serait de repousser le premier, c'est-à-dire de produire un mouvement contraire à celui qui a effectivement lieu.

614. Induction par l'action de la terre. — La terre pouvant être considérée comme un aimant, on conçoit que son action inductrice puisse déterminer un courant dans un circuit conducteur. La loi de Lenz permet de comprendre la disposition à l'aide de laquelle on a obtenu ce résultat. Nous avons vu en effet (562) qu'un

conducteur rectangulaire, mobile autour d'un axe horizontal perpendiculaire au méridien magnétique, se met en mouvement sous l'action de la terre et se place dans un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison. Si donc nous imprimons un mouvement artificiel de rotation au conducteur à l'état naturel, il se produira dans son intérieur un courant inverse de celui auquel la terre communiquerait le mouvement considéré. Il est clair que si on fait faire au rectangle une révolution complète, à partir de la position correspondante à l'équilibre, il se produira un courant dont le sens changera de la première demi-révolution à la seconde. Si donc on imprime au système un mouvement de rotation continu, il en résultera une série de courants successifs changeant de sens à chaque demi-révolution, mais qu'on pourra redresser à l'aide d'un commutateur et appliquer à la production de différents effets. C'est là le principe d'une machine fort curieuse construite peu d'années après la découverte de l'induction par MM. Linari et Palmieri, et dans laquelle, sans aimant, sans pile et par le mouvement seul d'un conducteur, on obtient un courant capable de produire tous les effets des courants ordinaires.

615. Induction d'un courant sur lui-même. — Extra-courant. — Lorsque l'on interrompt le circuit traversé par un courant, celui-ci ne cesse pas dans tous les points à la fois; il doit donc se produire une action inductrice de chaque élément à l'élément voisin dont le résultat est la production d'un courant induit de même sens que le courant donné; c'est le *courant induit sur lui-même.* L'existence de ce courant explique des phénomènes bien connus. Ainsi, quand on approche l'un de l'autre les deux rhéophores de la pile, on n'observe pas d'étincelle, à cause de la faible tension des électricités polaires; mais si après avoir réuni les rhéophores on les sépare, on observe une étincelle plus ou moins vive, toujours appréciable; c'est par elle qu'on s'assure ordinairement que le courant passe dans un circuit. Cette étincelle peut devenir très-brillante lorsque, le circuit ayant une grande longueur, on en enroule une portion en hélice et surtout quand on introduit dans cette hélice un noyau de fer doux. Il est évident, en effet, que la réaction des diverses parties du fil les unes sur les autres doit se faire dans ce

cas d'une manière plus efficace; et quant au fer doux, son aimantation cessant en même temps que le courant, il en résulte une action inductrice dont l'effet s'ajoute à l'induction même du fil.

On peut d'ailleurs démontrer directement l'existence de ce courant par l'expérience suivante : on introduit dans le circuit de

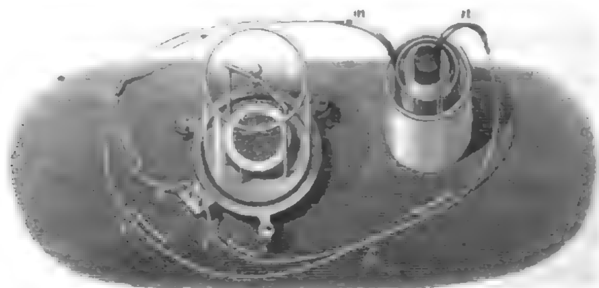


Fig. 546. — Induction d'un courant sur lui-même.

la pile (fig. 546) un fil de dérivation *asb* que l'on fait passer sur un galvanomètre; l'aiguille est déviée, mais on la ramène au 0 au moyen d'un obstacle placé du côté où elle dévie et qui permet son mouvement dans le sens opposé. Si alors on interrompt le circuit en *m* ou *n*, on voit l'aiguille dévier un instant en sens contraire. Au moment de la rupture du circuit, il se produit donc dans le fil de dérivation un courant contraire à celui qui le traversait précédemment; mais évidemment ce sens inverse dans le fil dérivé correspond à un sens direct dans l'autre portion *arb* du circuit. Il est donc démontré qu'au moment même de la rupture d'un circuit, il se superpose au courant qui le traverse un courant instantané et de même sens. On pourrait démontrer par une expérience analogue qu'au moment où le courant s'établit il y a induction d'un courant inverse.

Remarquons toutefois que, pour que l'expérience réussisse avec l'appareil qu'indique la figure, il faut introduire dans la portion *arb* du circuit une bobine renfermant un fil long, sans cela on n'observerait rien; on pourrait même constater, en modifiant un peu l'expérience, un effet contraire qui serait dû à la bobine formant le circuit galvanométrique.

Le courant induit dans le fil dérivé a reçu le nom d'extra-cou-

rant. Quoique d'une durée très-faible, il est susceptible de produire des effets physiologiques extrêmement marqués.

Si on suppose que la dérivation soit établie par le corps d'un observateur qui tiendrait à la main deux poignées métalliques en communication avec le circuit, à chaque interruption du courant l'observateur éprouvera une forte commotion, et si ces interruptions se succèdent avec une certaine rapidité, la série des commotions pourra être extrêmement pénible à supporter. Tous les appareils employés dans le traitement électrique des maladies (électrothérapie) empruntent, en réalité, leurs effets à l'extra-courant qui se produit au moment de l'interruption ou du changement de sens des courants induits.

616. Bobine d'induction de M. Ruhmkorff. — Le caractère propre des courants d'induction paraît être une tension polaire qu'on n'observe jamais dans la pile[1]. Il y a comme une sorte d'association fort intéressante et fort curieuse de l'état statique et de l'état dynamique de l'électricité. Cette particularité avait été clairement aperçue dès 1842 par Masson, qui, dans un travail fait en collaboration avec M. Bréguet, réussit avec les bouts d'un long fil induit à charger des condensateurs; on put même dans certains cas constater de petites étincelles de tension. Mais ces effets se produisent avec une intensité des plus marquées dans la bobine d'induction à laquelle M. Rhumkorff a attaché son nom.

L'appareil se compose (fig. 547) d'une bobine dont la partie centrale est formée par un faisceau de gros fils de fer bien dressés et reliés à leurs extrémités par deux disques de fer doux. Autour de ce noyau s'enroule un fil de cuivre de 2 millimètres de diamètre environ, c'est le fil inducteur; les extrémités aboutissent en f et f'. Le fil induit, d'un diamètre beaucoup plus petit $\left(\frac{1}{4}\text{ de millimètre}\right)$, a une longueur beaucoup plus considérable. Dans les grands modèles le fil inducteur a 80 mètres de longueur, le fil induit peut avoir jusqu'à 150 kilomètres. Les diverses spires de ces deux fils

1. Dans un travail récent sur les machines d'induction, M. Jamin a montré que la chaleur que ces machines régénèrent dans le circuit extérieur s'accorde parfaitement avec la loi de Joule, sous la condition que l'on mette dans les formules, à la place de la résistance, un nombre plus grand que celui qui représente la résistance réelle.

sont soigneusement isolées les unes des autres. Les deux extrémités du fil induit aboutissent en A et B à deux petites bornes métalliques supportées par des colonnes de verre. Si l'on imagine d'après cette disposition qu'on fasse arriver une série de courants interrompus

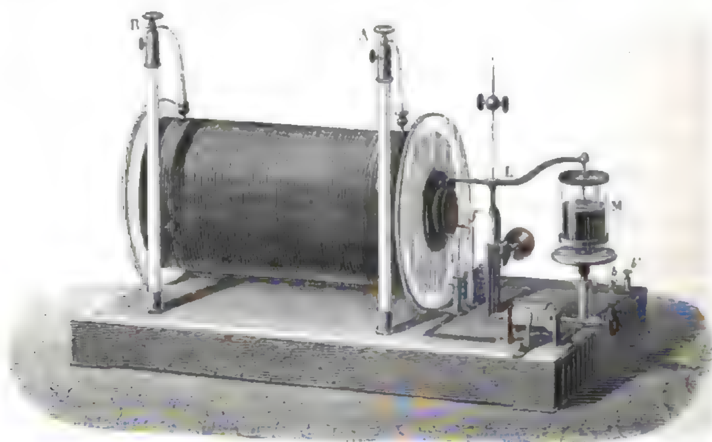


Fig. 547. — Bobine de Ruhmkorff.

dans le fil inducteur, il se produira une série correspondante de courants alternativement directs et inverses dans le fil induit. Ces interruptions se produisent automatiquement de diverses manières, suivant les modèles : ainsi dans les petites bobines on se sert d'un trembleur analogue à celui de la sonnerie des télégraphes; mais dans les bobines de plus grandes dimensions on préfère employer l'interrupteur de M. Foucault; c'est celui que représente notre figure.

Les rhéophores de la pile se fixent en b et b'. Le courant entrant par b, par exemple, passe au bouton commutateur C et de là à l'extrémité f par une languette de métal incrustée dans la table. Après avoir parcouru le fil inducteur il sort par f', d'où il passe à une colonne métallique portant supérieurement un ressort auquel est fixé le levier transversal L. L'une des extrémités du levier se termine par une pointe qui affleure sur le mercure du vase M, et le fond métallique de ce dernier est en communication avec b'. Enfin l'autre branche du levier L porte une petite masse de fer doux située au-dessus et à une petite distance du faisceau de fer doux de l'appareil.

Le courant venant à passer, le faisceau central s'aimante et la masse de fer doux est attirée, ce qui donne lieu à un mouvement du levier vers la gauche; mais alors la pointe sort du mercure, le circuit est rompu et le courant cesse; l'élasticité du ressort ramène la masse de fer doux et la pointe vient plonger dans le mercure; le courant passe de nouveau, et ainsi de suite. Ordinairement on verse au-dessus du mercure une légère couche d'alcool absolu dont la conductibilité est à peu près nulle, ce qui rend la fermeture et les interruptions presque instantanées.

Le commutateur C, employé d'ailleurs dans divers appareils électriques, sert à lancer le courant à volonté dans un sens ou dans un autre ou à l'interrompre. Voici comment ces fonctions sont accomplies.

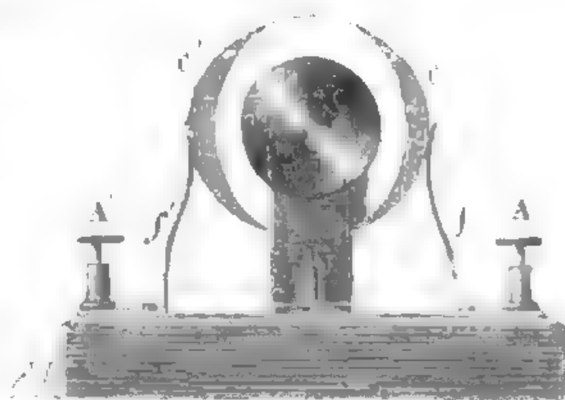


Fig. 548. — Commutateur de la bobine d'induction.

C'est un cylindre de matière isolante (fig. 548) tournant sur deux supports également isolants à l'aide de deux tourillons métalliques. L'un des tourillons est en communication continue par le moyen de la vis g avec la lame de cuivre C placée sur la surface du cylindre. Un lame de cuivre pareille et opposée C' communique d'une manière permanente avec le second tourillon par la vis g'. Ces deux plaques C et C' laissent entre elles à découvert une certaine portion de la surface isolante du cylindre. Le courant amené par les bornes A et A' peut, à l'aide des ressorts f et f', passer sur les plaques de cuivre, de là aux tourillons et enfin aux extrémités D et D' du circuit qu'on veut lui faire traverser. Il est clair que si on fait tourner le bouton de 180°, le courant aura dans le circuit une direction inverse; si enfin on tourne le bouton de façon que les ressorts f et f' s'appuient sur la partie isolante du cylindre, le courant ne passera pas. Il est à peine nécessaire de dire que le bouton mis en mouvement

à la main est soigneusement isolé du tourillon métallique; sans cette précaution l'observateur recevrait lors de la fermeture du circuit des commotions qui pourraient être fort dangereuses.

617. Étincelles de la bobine. — Si l'on ferme le circuit formé par le fil induit, celui-ci se trouve traversé par des courants alternativement dans un sens et dans l'autre qui correspondent à l'établissement et à l'interruption du courant inducteur. Ces courants directs et inverses ont d'ailleurs la même intensité. Si en effet on met le fil induit en rapport avec un voltamètre, on trouve dans les deux éprouvettes un mélange en égale proportion d'oxygène et d'hydrogène. Mais si le circuit induit offre quelque part une interruption, le courant inverse est supprimé par suite de sa tension plus faible; il ne reste que le courant direct, qui prend véritablement la forme statique et donne lieu dans l'air à des étincelles extrêmement brillantes et tout à fait identiques à celles que l'on tire d'une machine électrique. On peut s'en servir pour charger une batterie, percer une lame de verre, enflammer les corps combustibles, etc.

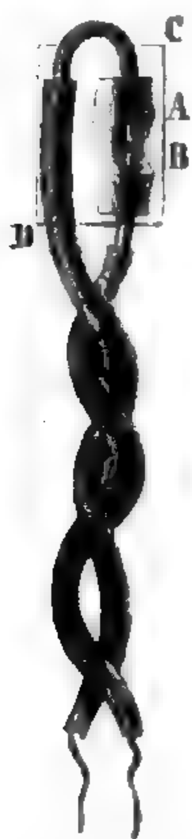


Fig. 549. Fusée de Stateham.

Ce dernier phénomène est utilisé dans l'inflammation des fourneaux de mine, que l'on peut ainsi produire à un instant rigoureusement déterminé, ce qui est un avantage fort important. On peut employer pour cela les fusées d'explosion dues à M. Stateham (fig. 549). Elles sont formées d'un fil de cuivre recouvert de gutta-percha et présentant une solution de continuité. Les deux bouts, séparés par un intervalle de quelques millimètres, sont placés dans un petit cylindre AB en gutta recouvert intérieurement de sulfure de cuivre. Le tout est placé dans une cartouche CD remplie de poudre. Au moment du passage de l'étincelle, le sulfure de cuivre rougit et la poudre s'enflamme.

618. Aspect de l'étincelle dans les gaz raréfiés. — Lorsqu'on met les deux extrémités du fil induit en communication avec l'œuf électrique (fig. 550) dans lequel on a raréfié l'air autant que possible, on voit une gerbe lumineuse d'une couleur purpurine s'élancer de la boule positive et s'arrêter à une petite distance de la

boule négative. Cette dernière est entourée d'une auréole bleuâtre, les deux lumières sont séparées par une petite zone obscure. Si on opère sur d'autres gaz que l'air, la teinte change, mais il y a toujours une différence prononcée entre les deux boules. On peut facilement, par le jeu du commutateur, changer le sens du courant et intervertir ainsi à volonté les apparences lumineuses caractéristiques des deux pôles.


Fig. 550. — Étincelles dans l'air raréfié.

Si avant de raréfier l'air on introduit dans l'œuf une petite quantité d'alcool, d'essence de térébenthine, de diverses autres substances volatiles, la lumière éprouve une modification curieuse ; elle présente une série de tranches alternativement brillantes et obscures ; c'est ce que l'on appelle la stratification de la lumière électrique. La planche II montre la lumière stratifiée dans la vapeur d'alcool.

Ces phénomènes sont plus frappants dans de longs tubes que dans l'œuf électrique, ils présentent d'ailleurs des variations de teinte très-prononcées suivant les différents gaz. M. Geissler a le premier construit des tubes où différents gaz sont très-raréfiés et qui peuvent recevoir le courant d'induction à l'aide de fils de platine fixés aux extrémités. Deux de ces tubes sont représentés dans la planche II. Certaines substances, telles que le verre d'urane, le sulfate de quinine, prennent sous l'action de la lumière électrique des teintes souvent fort vives qui sont désignées sous le nom de fluorescence ; en introduisant dans les tubes de Geissler des substances fluorescentes on peut obtenir des effets extrêmement brillants.

619. Action des aimants sur les courants transmis par les gaz raréfiés. — Les masses lumineuses des tubes de Geissler sont de véritables courants comme l'arc voltaïque, elles sont capables

d'agir sur l'aiguille aimantée et susceptibles réciproquement de subir l'action des aimants. On rend ceci manifeste par l'expérience suivante. Un cylindre de fer doux (fig. 551) est disposé dans un ballon où l'on peut raréfier l'air. Il est enveloppé sur toute sa hauteur d'une enveloppe isolante qui le sépare d'un anneau métallique placé à la partie inférieure du ballon. Lorsqu'on met en communication les deux pôles de la bobine avec l'anneau et la partie supérieure de l'appareil, une gerbe lumineuse s'élance du sommet vers l'anneau en enveloppant le fer doux. Si alors on place au-dessous de l'appareil ou un aimant proprement dit ou un électro-aimant animé par le courant d'une pile, le fer doux s'aimante et la gerbe lumineuse se met à tourner autour de lui. En considérant cette gerbe comme un courant, la rotation qu'elle éprouve est un simple phénomène d'électro-dynamique.

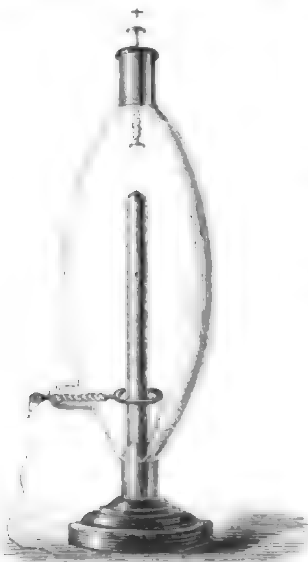


Fig. 551. — Action des aimants sur l'étincelle dans les gaz raréfiés.

Si l'on dispose un large anneau métallique à la partie supérieure de l'appareil, il se produit une véritable nappe lumineuse qui, lorsque le fer est aimanté, prend aussi un mouvement de rotation. M. de la Rive la considère comme une image assez exacte de ce qui se passe dans les aurores boréales. Ces phénomènes seraient constitués par de véritables décharges électriques dont l'ensemble formerait une nappe à laquelle le magnétisme terrestre imprimerait les mouvements que l'on observe toujours. Quant à l'origine des décharges, qui est surtout ce qu'il faudrait expliquer, M. de la Rive les attribue aux particules de vapeur d'eau qui, formées à la surface des mers vers l'équateur en emportant de l'électricité positive, seraient amenées aux pôles par les vents alizés et là se déchargeraient sur le sol. Dans leur passage de l'équateur aux pôles, les particules liquides se sont congelées et forment comme des conducteurs solides en présence du sol et séparés de lui par l'air raréfié.

Ces décharges d'ailleurs ne sont pas continues, il se produit en effet toujours un phénomène de condensation, et c'est par flots ou par ondes périodiques que les deux électricités contraires se réunissent.

620. Machines magnéto-électriques. — L'induction des courants par les aimants a donné lieu aux machines magnéto-électriques, dans lesquelles on produit sans pile, et par la seule influence des aimants, des courants que l'on peut utiliser de diverses manières. La première machine de ce genre fut construite en 1833, peu de temps après la découverte de l'induction, par le constructeur français Pixii. Dans cet appareil on faisait tourner un aimant A (fig. 552) en présence d'une bobine fixe BB' dont le fil devenait ainsi le siége d'un courant; la construction de l'appareil fut successivement améliorée par Saxton et Clarke, qui eurent l'idée de rendre l'aimant fixe et de faire tourner la bobine qui est plus légère. L'appareil, ainsi modifié et connu sous le nom de *machine de Clarke*, se trouve aujourd'hui dans tous les cabinets de physique.



Fig. 552. — Machine de Pixii.

621. Machine de Clarke. — La machine de Clarke se compose d'un faisceau magnétique AB (fig. 553), en fer à cheval, établi d'une manière fixe sur un support vertical; en face de l'aimant se trouve un système de deux bobines t et t' renfermant des noyaux de fer doux, réunis du côté de l'aimant par une plaque de cuivre et du côté opposé par une plaque de fer doux. L'enroulement du fil a lieu comme dans un électro-aimant ordinaire, c'est-à-dire en sens inverse sur chaque bobine. Les bobines sont portées par un axe f

qui traverse le support de l'aimant et se termine de ce côté par un petit pignon. Une chaîne sans fin, passant sur une roue munie d'une manivelle, permet de donner au pignon, et par suite aux

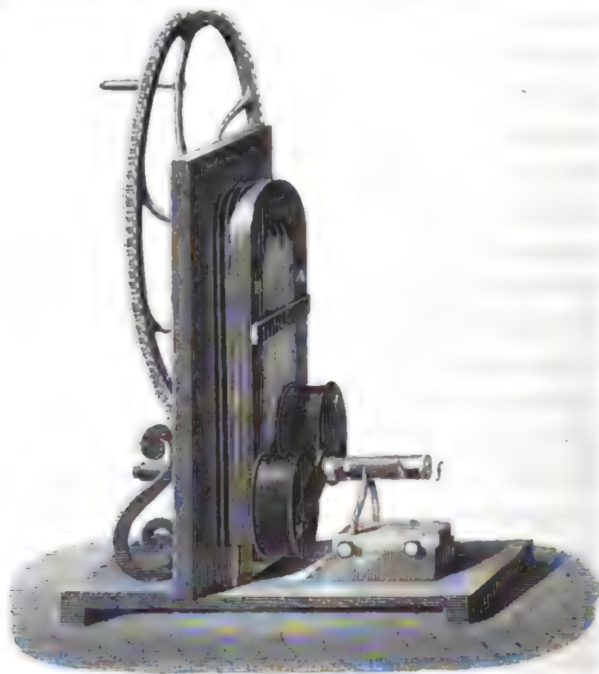


Fig. 553. — Machine de Clarke.

bobines, un mouvement de rotation rapide. Les deux bouts antérieurs du fil des bobines se réunissent en un seul qui vient se fixer à l'axe; les deux bouts postérieurs se réunissent aussi et sont en communication avec une virole en métal concentrique à l'axe, mais séparée d'elle par une couche isolante. Si l'on imagine que ces deux pièces soient réunies d'une

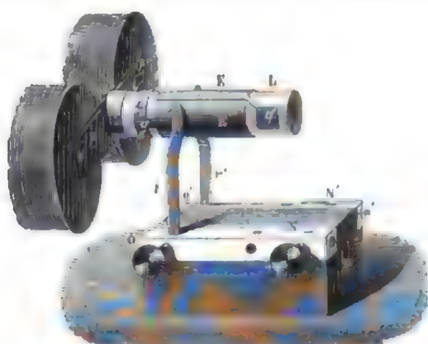


Fig. 554. — Commutateur de la machine de Clarke.

façon permanente par deux ressorts r et r' avec deux languettes métalliques O, O' (fig. 554) et que les extrémités N et N' de ces lan-

guettes communiquent ensemble elles-mêmes, on aura ainsi audevant de l'appareil un circuit dans lequel on pourra recueillir les courants auxquels l'induction produite par le mouvement donnera naissance.

Examinons maintenant comment ces courants se forment. Supposons l'électro-aimant horizontal, les noyaux en fer se trouvant exactement en regard des surfaces polaires des aimants, et imaginons que la rotation se produise de façon que la bobine qui est en face du pôle boréal B s'élève supérieurement et s'avance vers le pôle austral A. Pendant le premier quart de révolution l'aimantation du noyau en fer est décroissante, il se produira donc à ce moment dans la bobine un courant direct; pendant le second quart l'aimantation change de sens et elle devient croissante sous l'action du pôle A, ce qui donne lieu à un courant direct; mais l'aimantation ayant changé de sens, les deux courants se trouvent avoir en réalité la même direction. Pendant ce temps la seconde bobine s'éloignait du pôle A et s'approchait du pôle B. Ces deux effets font naître deux courants successifs de même sens, mais de sens contraire à ceux qui se produisent au même moment dans la première bobine. Mais il résulte de l'enroulement inverse des deux fils que, lorsque ces courants pénètrent dans le circuit extérieur, ils y prennent la même direction que celle du courant qui provient de la première bobine. Donc, en définitive, on voit que pendant la demi-révolution du système toutes les actions inductrices concourent à lancer dans le circuit extérieur un courant d'un sens déterminé; il est clair qu'à la demi-révolution suivante le sens sera changé. Si donc le mouvement de rotation continue, le circuit extérieur sera traversé par une série de courants dirigés alternativement dans un sens et dans l'autre, le sens changeant à chaque demi-révolution de la bobine.

A l'aide d'un commutateur qui est représenté en perspective dans la figure 554, on peut redresser ces courants et les faire circuler à l'extérieur dans un sens unique. A cet effet, on dispose sur la surface isolante de l'axe deux demi-viroles E, E′ séparées l'une de l'autre par deux portions qui se trouvent dans le même plan que les deux axes des bobines. L'une d'elles communique avec le collier *e*

qui est l'un des pôles de l'appareil, par la languette *g*, et l'autre, par le moyen d'une vis, est en communication permanente avec l'axe. Les deux ressorts *r* et *r'*, établis sur les banquettes O et O', s'appuient constamment sur les viroles; or il est clair qu'au moment où le courant change de sens, les ressorts changent de virole, et par suite la direction dans le circuit extérieur reste constante.

On peut, avec la machine de Clarke, décomposer l'eau, rougir un fil métallique, animer un électro-aimant, etc. Toutefois, avec les dimensions que possèdent en général les machines des cabinets de physique, les effets obtenus sont d'une intensité très-médiocre et ont un caractère purement démonstratif.

Quand on veut appliquer la machine de Clarke à la production des commotions, on fixe en N et N' des fils métalliques terminés par des poignées qu'un observateur prend dans les mains, après avoir eu la précaution de les mouiller un peu avec de l'eau acidulée; on ajoute en outre sur la banquette un troisième ressort qui vient s'appuyer sur les plaquettes *q* qui se trouvent sur des prolongements des viroles E et E'. Au moment où une de ces plaquettes est en contact avec le troisième ressort, le courant se ferme directement et cesse de passer par le corps de l'observateur; il y a donc une interruption accompagnée d'un extra-courant qui produit la commotion.

622. Machines magnéto-électriques des phares. — Pour obtenir avec la machine de Clarke des effets intenses et susceptibles de recevoir une application pratique, il faut donner à l'appareil de grandes dimensions et imprimer au système des hélices un mouvement de rotation rapide. C'est le principe de la machine magnéto-électrique imaginée primitivement par M. le professeur Nollet, de Bruxelles, en 1850, et qui est aujourd'hui construite dans les ateliers de la compagnie l'Alliance. Ces machines sont appliquées à produire la lumière électrique des phares de la Hève (le Havre); elles sont susceptibles d'ailleurs de recevoir des applications diverses, en particulier on peut les faire servir à produire l'électricité nécessaire pour le fonctionnement d'un atelier de galvanoplastie. La figure 555 représente une vue perspective de la machine, dont nous donnerons une description succincte. Elle se compose de huit séries de faisceaux aimantés disposés sur la surface d'un

bâti octogonal en fonte; ces aimants sont disposés de façon que dans la série linéaire des pôles, parallèlement à l'axe du bâti, aussi bien que sur la circonférence perpendiculaire au même axe, les pôles soient alternativement de sens contraire.

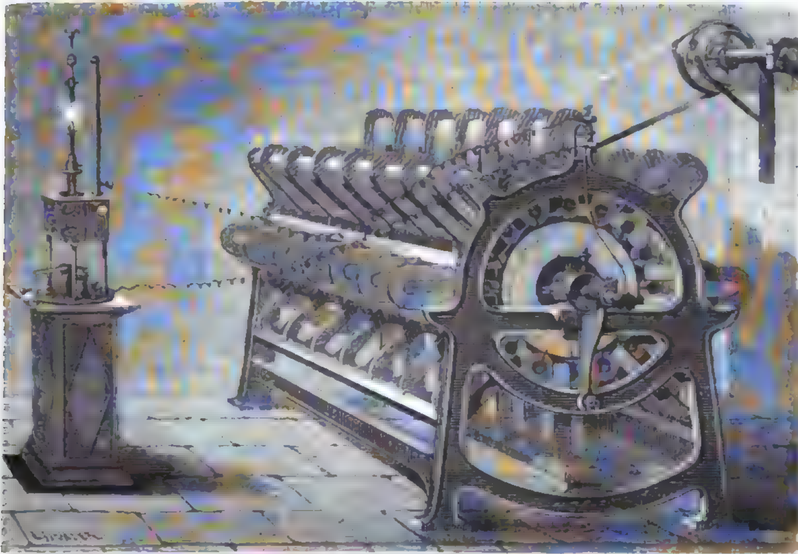


Fig. 555. — Machine de l'Alliance.

Dans l'intervalle laissé entre deux séries circulaires d'aimants, sont disposés des rouleaux de bronze montés sur un axe auquel un moteur à vapeur imprime, par le moyen de courroies de transmission, une vitesse de rotation qui est ordinairement de 350 tours par minute. A la surface de ces rouleaux sont posées horizontalement seize bobines cylindriques, autant qu'il y a de pôles dans la série circulaire d'aimants. Le noyau des bobines est formé d'un cylindre en fer doux fendu sur toute sa longueur; on a reconnu que cet artifice rend plus rapide la désaimantation lors du changement de sens de l'influence.

Il résulte de cette disposition générale que chaque bobine regarde par ses extrémités les pôles contraires de deux aimants et que, dans son mouvement de rotation, chacune de ses extrémités passe successivement d'un pôle à l'autre de la série circulaire d'aimants.

Supposons d'après cela que, les bobines étant exactement en

regard des surfaces polaires, la roue tourne de $\frac{1}{16}$ de la circonférence, chaque fer s'aimantera dans la première moitié et se désaimantera dans la seconde moitié de cette excursion; il en résultera deux courants de même sens dans chaque hélice, et, par suite de la disposition alterne des organes, des courants de même sens dans toutes les hélices; au $\frac{1}{16}$ de tour suivant, les courants seront tous renversés. Par une liaison convenable des hélices, tous ces courants sont réunis; toutes les extrémités positives des bobines sont en communication avec l'axe de la machine, toutes les extrémités négatives communiquent avec un manchon concentrique séparé de l'axe par une matière isolante; ce sont là les deux pôles qui aboutissent au circuit extérieur.

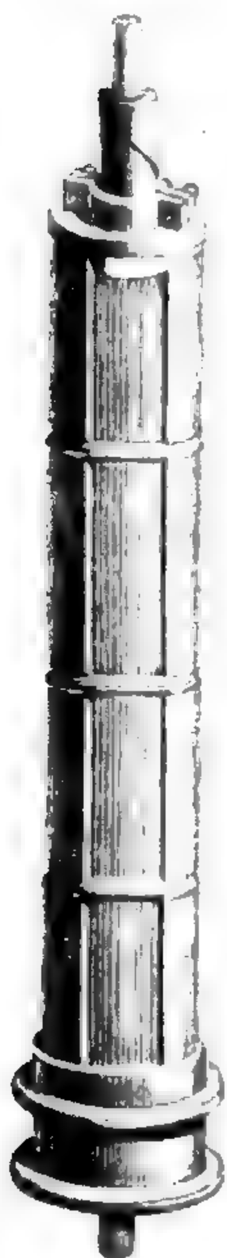


Fig. 556. Bobine de Siemens.

Quand la machine est appliquée à la production de la lumière électrique, les courants n'ont pas besoin d'être redressés; si on veut l'appliquer à un atelier de galvanoplastie, il faut établir un commutateur analogue à celui de la machine de Clarke.

Les machines employées à la Hève pour l'éclairage des phares sont mises en mouvement par un moteur de trois chevaux de force.

623. Bobine de Siemens. — La machine de Clarke a reçu de M. Siemens de Berlin, en 1854, un perfectionnement des plus importants, qui en accroît singulièrement la puissance, et qui consiste dans une disposition spéciale de l'électro-aimant. Dans la disposition ordinaire, le noyau de l'électro-aimant est nécessairement fort court, car il faut, pour que l'induction se produise, que la distance à l'aimant inducteur ne soit pas considérable. On ne saurait non plus, pour une raison analogue, augmenter beaucoup la longueur du fil conducteur, parce que, à mesure que l'épaisseur s'accroît, la distance aux régions polaires augmente aussi et l'action inductrice devient faible. Pour éluder ces difficultés, M. Siemens forme le noyau de l'électro-aimant d'un cylindre en fonte de fer *ab* (fig. 557) dont la surface présente deux

profonds évidements parallèles à l'axe; c'est dans cette double cavité que s'enroule le fil conducteur parallèlement à la longueur même du cylindre. Les extrémités de celui-ci sont vissées dans des garnitures métalliques AB, MN, qui portent les axes de rotation et

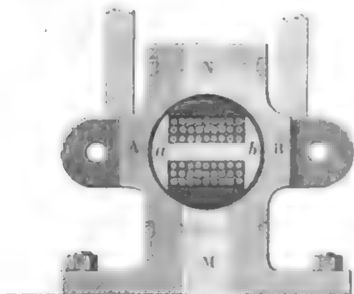


Fig. 557.
Bobine de Siemens.

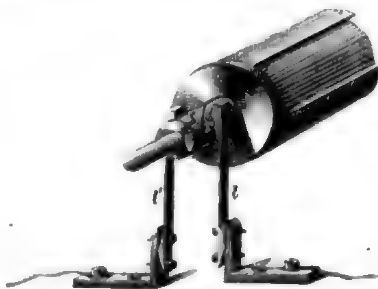


Fig. 558.
Pôles de la machine de Siemens.

les organes du commutateur. La figure 556 montre la disposition extérieure de la bobine.

L'avantage de cette disposition est énorme; la bobine d'un petit rayon peut ainsi être placée entre les régions polaires d'aimants en fer à cheval réunis en faisceau sur toute sa longueur; d'ailleurs, la forme de la bobine permet de lui donner une vitesse de rotation considérable et de multiplier ainsi le nombre de courants induits. Le sens de ces courants change d'ailleurs à chaque demi-révolution comme dans la machine de Clarke; on les redresse à l'aide d'un commutateur analogue (fig. 558). L'une des extrémités du fil conducteur est fixée au noyau même de la bobine et communique par suite avec l'axe de rotation; l'autre extrémité communique avec une virole isolée de l'axe par une plaque non conductrice. Les machines de Siemens donnent, avec des dimensions bien moindres, des effets très-supérieurs à ceux de la machine de Clarke.

624. Machine de Wilde. — Imaginons qu'au lieu d'utiliser directement le courant de la bobine dans la machine de Siemens, on l'emploie à animer un électro-aimant, on pourra obtenir dans celui-ci une force magnétique beaucoup plus intense que celle qui a lieu dans l'aimant inducteur. Qu'on place alors entre les branches de cet électro-aimant une seconde bobine à laquelle on imprime un

mouvement de rotation rapide, il pourra se développer dans son intérieur des courants d'une intensité extrême; c'est le principe de la machine imaginée récemment par M. Wilde, de Manchester. La figure 559 représente la disposition de cette machine; elle est littéralement formée de deux machines de Siemens superposées. La machine supérieure est constituée par un faisceau d'aimants fixes M.

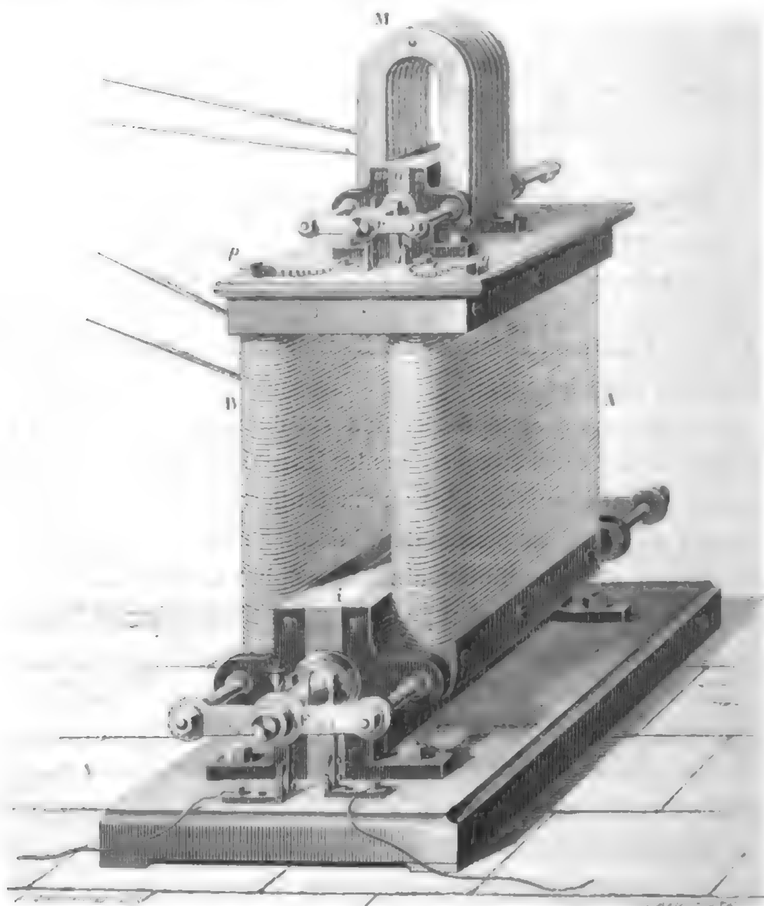


Fig. 559. — Machine de Wilde.

dont les pôles s'appuient sur deux armatures en fer doux m, n, séparées par une plaque de laiton o; dans cette masse de métal se trouve ménagée une cavité cylindrique dans laquelle tourne une bobine Siemens r. Le courant produit dans la bobine, après avoir

été redressé par le commutateur, se rend aux bornes p et q et de là à l'électro-aimant AB. Ce dernier est formé de deux plaques de fer, réunies à leur partie supérieure par une plaque de même nature qui sert de support à la première machine. Les extrémités inférieures s'appuient, comme les pôles des aimants supérieurs, sur les armatures C séparées par la masse de laiton i, et c'est dans l'intérieur de ce système que tourne la seconde bobine F dont le diamètre est à peu près trois fois celui de la première; c'est le courant fourni par cette seconde bobine que l'on utilise à l'extérieur. La machine de Wilde produit des effets calorifiques et lumineux d'une remarquable intensité, mais à la condition de donner aux bobines une très-grande vitesse, qui peut atteindre 1500 tours par minute pour la grande et 2000 tours pour la petite. C'est là un inconvénient des plus graves et qui paraît, quant à présent, inhérent à la nature même du mécanisme; aussi il ne paraît pas que ces machines aient pu être encore appliquées utilement à la production de la lumière électrique dans les phares.

On pourrait pousser plus loin le principe de la machine de Wilde et se servir du courant de la seconde bobine pour animer un deuxième électro-aimant plus considérable que le premier, dans l'intérieur duquel se mouvrait une troisième bobine. C'est ce qui a été fait par M. Wilde. A l'aide de cette machine triple, qui exigeait pour être mise en mouvement la force de 15 chevaux, le courant entretenait la lumière électrique dans une lampe à charbons gros comme le doigt et fondait rapidement une barre de platine de 2 pieds de long et d'un quart de pouce de diamètre[1].

On pourrait ainsi multiplier, pour ainsi dire, sans limite la quantité d'électricité produite, mais en dépensant une force qui croîtrait elle-même d'une manière correspondante, et c'est à ce point de vue surtout que la machine de Wilde doit être remarquée. Elle nous offre en effet un nouvel exemple curieux de la conversion du travail mécanique en électricité.

625. Machines dynamo-électriques. — Le point de départ de la machine de M. Wilde est un aimant fixe; on pourrait imaginer

1. Bertin, *Annales de physique et de chimie*, 4e série, t. XV, p. 176.

que ce soit un électro-aimant faisant partie d'une série dont le premier terme serait un aimant d'une intensité tout à fait insignifiante, telle, par exemple, que celle qui existe dans le fer doux des électro-aimants quand on y a fait passer une première fois un courant. On est donc conduit à penser qu'on pourrait supprimer les aimants et produire les courants par la rotation seule. Ce résultat des plus intéressants a été réalisé par M. Siemens dans le courant de l'année 1866. La machine construite par lui reçut le nom de *machine dynamo-électrique*, dénomination expressive qui rappelle la conversion de la force en électricité. La disposition adoptée n'est pas toutefois celle que nous avons indiquée pour faire comprendre la possibilité des machines de ce genre. Au lieu de multiplier l'action magnétique en transportant le courant d'un électro-aimant à un autre, on peut atteindre le même but en le faisant circuler successivement dans le même électro-aimant. A cet effet, le courant engendré dans la bobine par le faible magnétisme que possède le noyau de l'électro-aimant passe dans l'électro-aimant lui-même et en augmente l'intensité, d'où résulte à la demi-révolution suivante un courant plus fort qui augmente encore la force de l'électro-aimant et ainsi de suite jusqu'à une certaine limite qui dépend évidemment de la vitesse de rotation. Telle est la disposition de la machine de Siemens qu'on a pu voir à l'Exposition de 1867 et qui était particulièrement destinée à l'inflammation des mines. Un interrupteur fonctionnant périodiquement lançait le courant dans le circuit extérieur qui aboutissait à la mine.

626. Machine de Ladd. — M. Ladd, constructeur anglais, a fait connaître dans le courant de 1867 une machine dynamo-électrique fondée sur le même principe que celle de M. Siemens, mais avec une amélioration importante. Au lieu d'utiliser le courant de l'électro-aimant à l'aide d'un interrupteur, il se sert d'une seconde bobine que l'on met en rapport permanent avec le circuit extérieur.

L'appareil se compose de deux plaques de fer B, B' entourées d'un fil conducteur, dont les extrémités correspondantes à la partie droite de la figure 560 sont réunies ensemble de manière à former un circuit unique; les deux autres bouts viennent se fixer à

deux bornes en rapport avec les pôles d'une bobine de Siemens a'. L'enroulement est d'ailleurs tel, que par le passage du courant les extrémités voisines prennent une polarité opposée. Ces extrémités sont fixées sur des masses polaires de fer doux MM, NN dans l'intérieur desquelles se meuvent les deux bobines. Les extrémités des fils de la bobine de droite a sont en rapport avec un circuit exté-

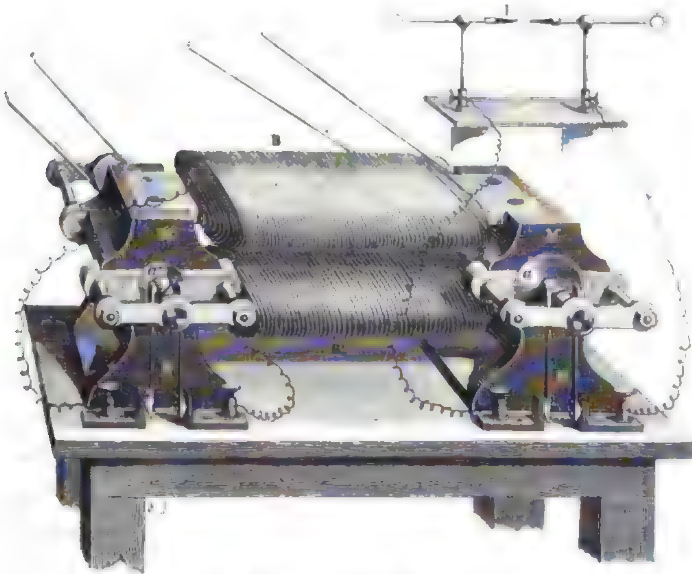


Fig. 500. — Machine de M. Ladd.

rieur où se trouvent, par exemple, les charbons I pour la lumière électrique. D'après les explications précédentes le jeu de la machine est très-facile à comprendre. Supposons qu'on fasse passer pendant quelques instants un courant dans l'électro-aimant, il reste après sa cessation un léger magnétisme rémanent dans les noyaux. Si on fait alors tourner la première bobine a', elle devient le siége d'un courant qui passe dans l'électro-aimant et en augmente graduellement l'intensité; celle-ci finit même par devenir très-considérable si le mouvement de rotation est suffisamment rapide. Si alors on met en mouvement la seconde bobine a, il s'y produira un courant qu'on pourra lancer, après l'avoir redressé s'il y a lieu, dans un circuit extérieur.

On construit aujourd'hui des machines dans lesquelles les deux

bobines sont placées sur le même axe, mais avec des surfaces polaires croisées ; l'une d'elles communique avec l'électro-aimant et l'autre avec le circuit extérieur. On peut aussi, comme le fait M. Ruhmkorff, se servir d'une bobine unique sur laquelle s'enroulent deux fils de longueurs différentes, dont l'un est mis en communication avec l'électro-aimant et l'autre avec le circuit extérieur.

Les machines magnéto-électriques et dynamo-électriques, indépendamment de leur avenir industriel, sont surtout remarquables parce qu'elles montrent d'une manière très-nette la conversion du mouvement en électricité. Il importe de remarquer toutefois que cette conversion n'est pas complète, et qu'une portion notable du travail se trouve transformée en chaleur. C'est là un fâcheux résultat et à peu près inévitable, quant à présent, puisqu'il résulte de la très-grande vitesse que l'on est obligé de donner aux organes de la machine.

627. Magnétisme de rotation. — L'induction électro-magnétique rend compte très-simplement du phénomène découvert par Arago en 1824 et resté longtemps sans explication : c'est ce que l'on appelle le magnétisme de rotation. Une plaque de cuivre *bb* placée dans l'intérieur d'une boîte reçoit d'un rouage d'angle un mouvement de rotation rapide. Au-dessus du couvercle supérieur de la boîte, formé par une lame mince, on dispose sur un support bas une aiguille aimantée *aa*. Lorsque l'aiguille est en équilibre dans le méridien magnétique, si l'on vient à faire tourner le disque, l'aiguille est déviée dans le sens même du mouvement. Tant que la vitesse de rotation ne dépasse pas une certaine limite, il n'y a qu'une déviation, mais si on tourne avec rapidité, l'aiguille est entraînée et se met à tourner plus ou moins rapidement dans le même sens que le disque. La cause de ce mouvement gît dans les courants induits qui se forment sur le disque et qui sont dus à son déplacement par rapport à l'aimant. Dans la portion du disque qui

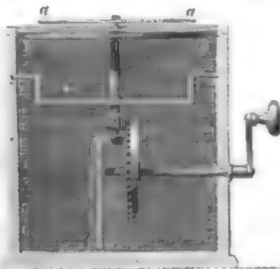


Fig. 561. — Magnétisme de rotation.

se rapproche il y a formation de courants contraires à ceux de l'aimant, courants qui engendrent une force répulsive; dans la portion qui s'éloigne les courants sont au contraire de même sens et donnent lieu à une force attractive; de cette double action résulte l'entraînement de l'aiguille.

Si, au lieu d'employer un disque plein, on se sert d'un disque évidé dans le sens des rayons, le phénomène disparaît presque complétement, ce qui s'explique par la difficulté qu'oppose la discontinuité du disque à la production des courants. On a constaté directement l'existence des courants et déterminé leur sens en explorant à l'aide des deux bouts du galvanomètre l'état du disque en mouvement. Il convient dans cette expérience d'aplatir et d'amalgamer les extrémités du fil, on peut ainsi avoir un contact sûr sans être obligé de les appuyer fortement contre le disque.

628. Machines électro-médicales. — Quelques médecins se servent de l'électricité pour le traitement de certaines affections nerveuses ou des paralysies locales. Les appareils employés dans ce but sont très-diversement agencés. L'un des plus commodes, représenté par la figure 562, est constitué par deux petites bobines accouplées et munies d'un interrupteur-trembleur. Les bobines sont recouvertes d'un manchon de laiton, qui, au moment de l'induction, devient aussi le siége de courants induits. Ces courants agissent évidemment pour diminuer l'intensité de ceux qui se produisent dans le fil induit. C'est cette circonstance que l'on utilise pour graduer les commotions. Quand les bobines sont absolument recouvertes, la commotion est très-faible; elle augmente de force à mesure qu'on en découvre une plus grande partie. Le courant est fourni par une petite pile à sulfate de mercure.

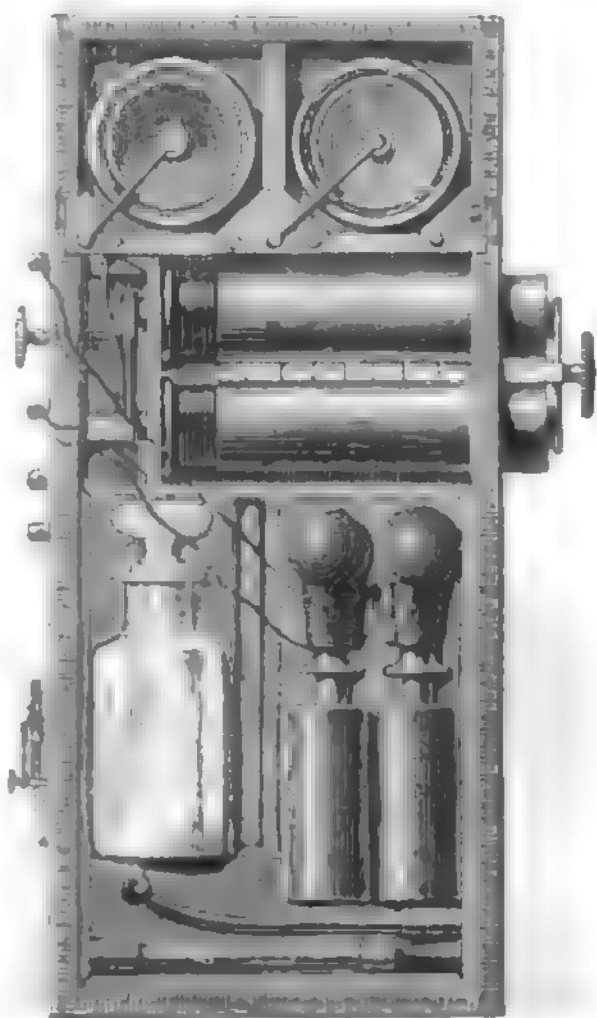


Fig. 562. — Machine électro-médicale.

ACOUSTIQUE

CHAPITRE LIII.

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON.

629. Le son est une vibration. — Le son et le bruit sont des impressions d'une nature spéciale que l'oreille perçoit dans leurs diverses nuances, comme l'œil perçoit la lumière et les couleurs. Toute explication sur le caractère de ces impressions qui jouent un si grand rôle dans notre existence serait superflue, et nous devons nous borner à en faire connaître la condition physique. A cet égard il est facile de montrer par des expériences fort diverses que le son est le résultat d'un mouvement particulier qu'on appelle un mouvement vibratoire.

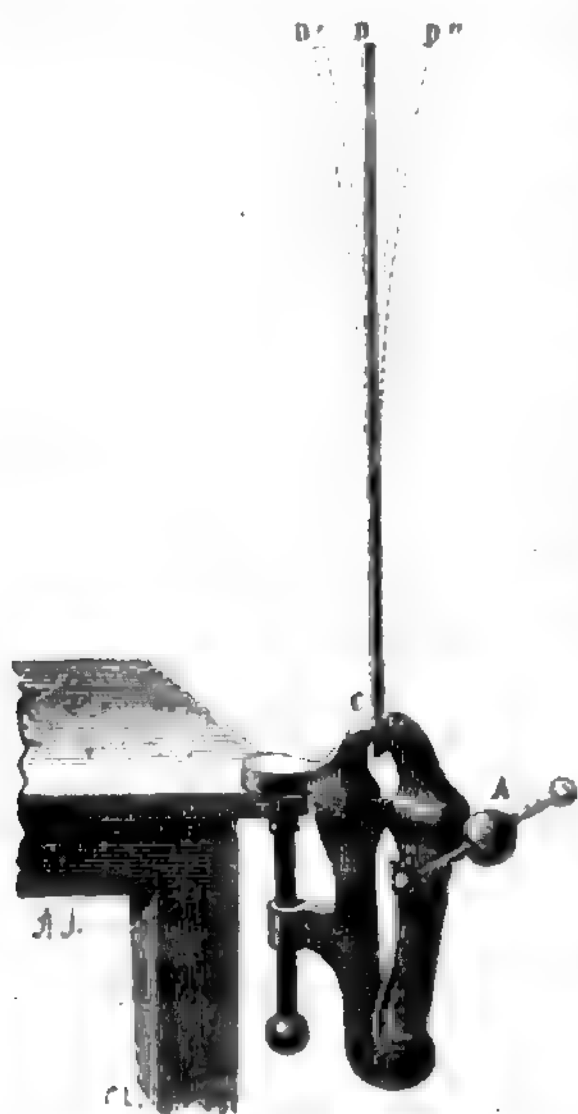


Fig. 563. — Vibration d'une lame élastique.

Supposons, par exemple, qu'entre les mâchoires d'un étau A (fig. 563), on fixe l'une des extrémités C d'une lame élastique CD, qu'on amène l'extrémité supérieure D en D', et qu'on l'abandonne à elle-même. En vertu de son élasticité (22), la lame reviendra à sa position primitive; mais par suite de sa vitesse acquise, elle la dépassera, arrivera en D'' et exécutera autour de CD une série d'oscillations, dont l'amplitude ira graduellement en décroissant

et finira par s'éteindre au bout d'un temps plus ou moins long. C'est là ce qu'on appelle un mouvement vibratoire. L'excursion de D' en D'' ou de D'' en D' se nomme une *vibration* ou une *oscillation*; on désigne quelquefois sous le nom de *vibration* ou *oscillation complète* le double mouvement d'aller et de retour. Ces vibrations sont dues à l'élasticité de la substance qui forme la lame, elles ont quelque analogie avec les oscillations du pendule; comme ces dernières elles sont isochrones, quelle que soit l'amplitude. Il y a même lieu de remarquer à ce sujet que cet isochronisme, qui n'est qu'approché dans le cas du pendule, est tout à fait rigoureux pour les vibrations élastiques[1].

Tant que la lame élastique est suffisamment longue, les vibrations se font avec assez de lenteur, et l'œil peut les suivre directement; mais à mesure qu'on raccourcit la lame, le mouvement vibratoire devient de plus en plus rapide, et il arrive un instant où il cesse d'être perceptible à la vue. Mais alors que cesse pour ainsi dire le rôle de l'organe de la vision, celui de l'organe de l'ouïe commence et l'oreille entend un son parfaitement net et dont la nature dépend d'ailleurs des conditions physiques du corps vibrant.

Cette expérience nous montre donc qu'un mouvement vibratoire peut produire un son, à la condition toutefois d'être suffisamment rapide. Dans les expériences suivantes on constate de diverses façons que le mode spécial d'ébranlement qui fait résonner un corps consiste précisément dans un état vibratoire.

Vibration d'une cloche. — On dispose à côté, et presque au contact d'un cloche en cristal (fig. 564), une pointe portée par un support. Si on frotte alors avec un archet les bords de la cloche de manière à lui faire rendre un son, on entend une série de petits chocs qui rendent sensible le mouvement vibratoire du corps. Une petite bille suspendue à un fil est repoussée par la cloche et oscille pendant tout le temps que le son dure. Il suffit d'ailleurs de poser

1. La loi des écarts moléculaires dus à l'élasticité est que cet écart est proportionnel à l'intensité de la force qui le produit (23). Or on démontre en mécanique que toutes les fois qu'un point matériel se meut vers un point fixe en vertu d'une force proportionnelle à la distance qui le sépare de ce point, il se produit un mouvement vibratoire dont les vibrations sont rigoureusement isochrones.

légèrement la main sur la cloche pour sentir un frémissement caractéristique, et si on appuie avec force, le mouvement vibratoire disparait avec le son lui-même.

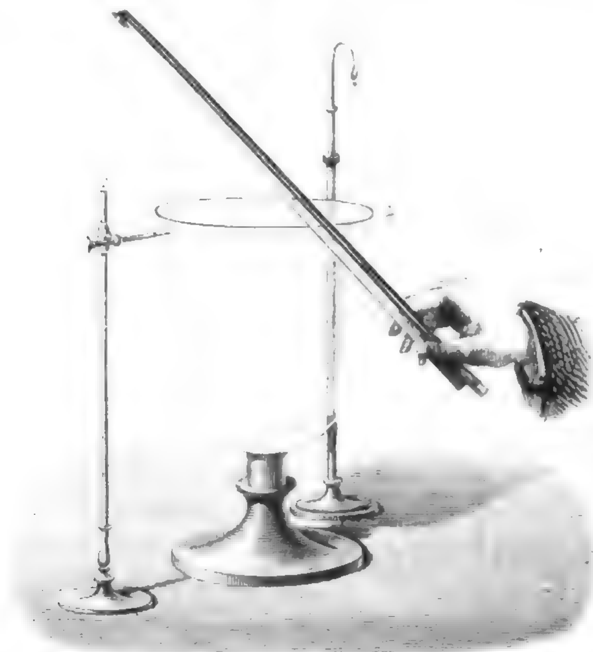


Fig. 564. — Vibration d'une cloche.

Vibration d'une plaque. — On répand du sable fin à la surface d'une plaque (fig. 565) qu'on fait résonner ensuite en frottant son bord avec un archet. Aussitôt que le son se fait entendre, on voit le sable sautiller, fuir certaines parties et se réunir sur de certaines lignes que l'on désigne sous le nom de *lignes nodales*. Ce sont des lignes autour desquelles s'exécutent les mouvements vibratoires inverses des parties voisines. Leur disposition change avec la nature du son produit; mais, quoi qu'il en soit à cet égard, le mouvement du sable accuse toujours l'état de vibration auquel est dû le phénomène sonore.

Cet état vibratoire se manifeste d'une autre façon assez curieuse. Si au sable ordinaire on mêle une poussière très-fine, comme celle du lycopode, celle-ci s'accumule dans les parties comprises entre les lignes nodales, et on la voit s'y amasser en petits tas qui sont d'ailleurs dans un état de gyration continuel. C'est un effet de l'air exté-

rieur, qui, continuellement ébranlé par la plaque, finit par prendre un mouvement tournant qui entraîne la poussière fine, mais qui est

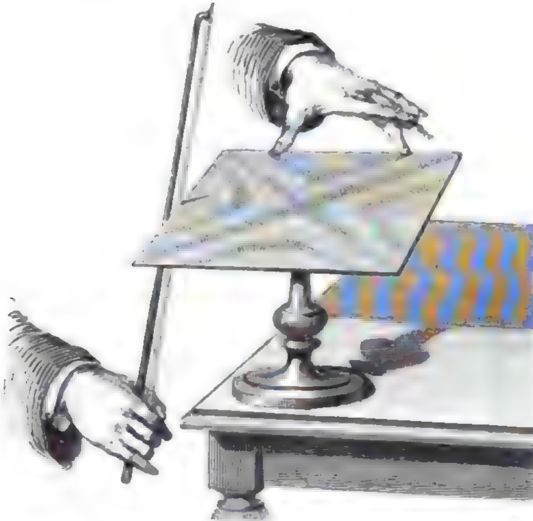


Fig. 565. — Vibration d'une plaque.

insuffisant pour déplacer le sable. Dans le vide le lycopode se réunit au sable.

Vibration d'une corde. — Quand on ébranle une corde de façon à la faire résonner, on la met dans un état vibratoire que rend sensible la forme même qu'elle présente; elle a l'aspect d'un fuseau allongé (fig. 566). C'est qu'à raison de la persistance des impressions sur la rétine et de la vitesse du mouvement vibratoire, l'œil voit la corde dans toutes ses positions à la fois, la durée d'une vibration étant moindre que le temps pendant lequel dure une impression lumineuse.



Fig. 566. Vibration d'une corde.

Vibration de l'air. — Le corps sonore peut être quelquefois l'air, c'est ce qui arrive dans les tuyaux sonores qui seront décrits plus loin. Or il est facile de constater que, dans le cas où le tuyau parle, l'air est dans un état vibratoire. On se sert pour cela d'un tuyau (fig. 567) dont une des parois en verre permet de voir ce qui se passe à l'intérieur, on introduit une petite membrane *m* tendue sur un cadre et recouverte de sable

fin ; on voit celui-ci projeté dans toutes les directions, on entend le choc des grains qui retombent sur la membrane, et tous ces phénomènes s'arrêtent si on arrête le courant d'air qui fait résonner le tuyau.

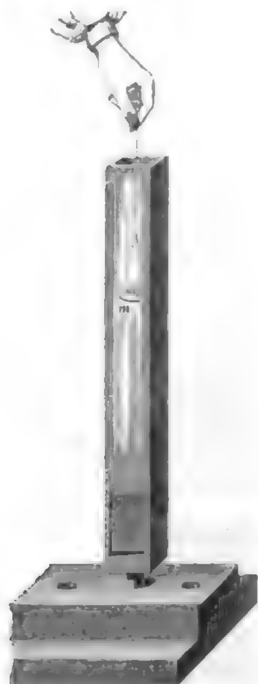


Fig. 567. — Vibration de l'air.

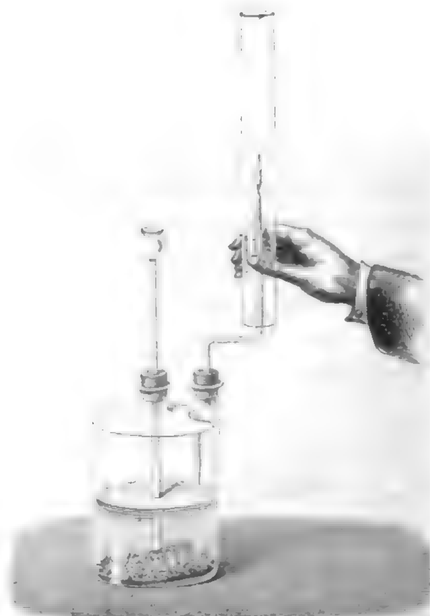


Fig. 568. — Harmonica chimique.

Harmonica chimique. — Cet état vibratoire de l'air se produit dans l'expérience curieuse de l'harmonica chimique. On adapte à un appareil, où se produit de l'hydrogène (fig. 568), un tube terminé par un bec effilé, et on enflamme le jet de gaz; on a ainsi ce que l'on appelle la *lampe philosophique*. Or, si on entoure la flamme d'un tube plus large ouvert aux deux bouts, on entend un son dont la nature dépend des dimensions du tube, et qui présente quelquefois un plein et une sonorité remarquables. Ce son est dû à un état vibratoire de l'air. En effet, la combustion de l'hydrogène n'est autre chose que la formation de l'eau par suite de la combinaison de ce gaz avec l'oxygène, et, bien que le phénomène ait une continuité apparente, ce sont en réalité des portions successives d'eau qui se

forment, se réduisent en vapeur à la température élevée de la combustion et se condensent ensuite plus ou moins complétement. Il y a donc dans l'air une série de mouvements de dilatation et de contraction, c'est-à-dire un véritable mouvement vibratoire. Ce mouvement est activé par le tube qui produit un courant d'air autour de la flamme, et qui offre d'ailleurs une masse de gaz limitée pouvant être plus facilement ébranlée. Il n'est pas nécessaire d'opérer sur le gaz hydrogène; l'expérience peut être faite avec l'oxyde de carbone, qui par sa combustion fournit de l'acide carbonique; l'état vibratoire résulte ici des variations successives de température pendant et après la combustion. Le simple écoulement d'un fluide pourrait suffire à déterminer le mouvement vibratoire de l'air environnant, car cet écoulement est non pas un phénomène continu, mais une expulsion successive et périodique de particules.

Expérience de Trevelyan. — On prend une masse de cuivre ayant la forme d'une gouttière, que l'on fixe au bout d'un manche bien arrondi, et après l'avoir chauffée à une température de 100° ou

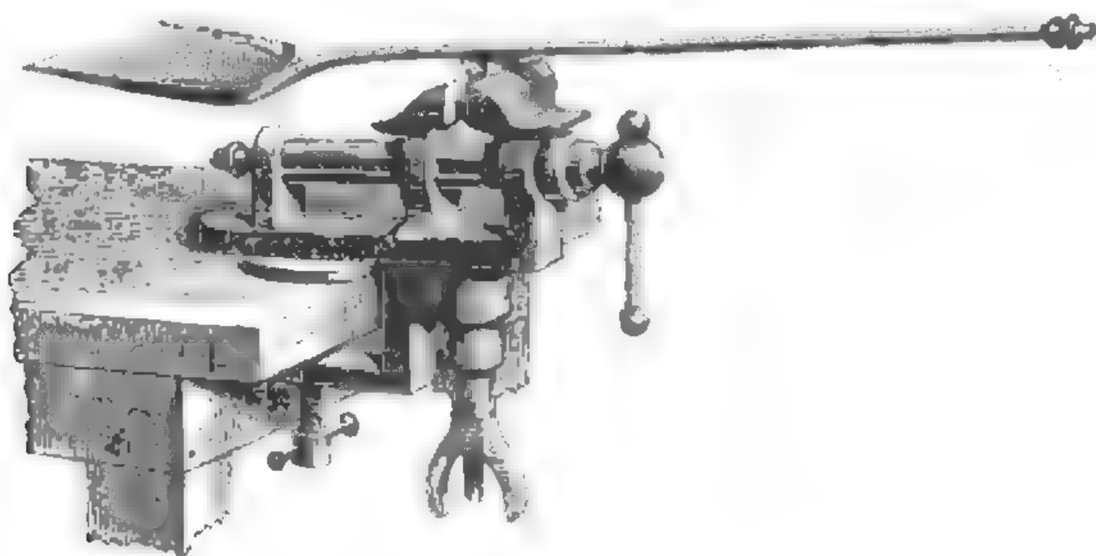


Fig. 569. — Expérience de Trevelyan.

au delà, on la pose sur un morceau de plomb. On entend aussitôt sortir de l'instrument une note généralement un peu aiguë. On peut faire l'expérience avec une pelle (fig. 569) que l'on chauffe et que l'on pose ensuite en équilibre sur deux lames de plomb placées dans un étau ; on la voit alors exécuter une sorte de petit balancement, à peine perceptible d'ailleurs, pendant le temps que dure le phénomène sonore. On peut rendre ce balancement très-sensible en fixant quelque part sur la pelle un petit miroir argenté sur lequel on dirige un rayon de lumière; le faisceau réfléchi va

former sur un écran une image que l'on voit, pendant toute la durée de l'expérience, exécuter des mouvements oscillatoires.

Les vibrations observées dans cette expérience sont dues à l'expansion brusque du métal froid. Au moment où un point du plomb est touché par le corps chaud, il y a une dilatation, une sorte de boursouflement qui repousse le fer; ce dernier touche alors le plomb par un autre point, où le même effet se renouvelle, tandis que le point primitivement touché se refroidit et revient à son état initial. Il y a donc une série de dilatations et de contractions successives, c'est-à-dire un état vibratoire qui produit précisément le phénomène sonore.

630. Différence entre le son et le bruit. — La différence entre le son et le bruit est difficile à préciser d'une manière rigoureuse. Ordinairement on appelle bruits des sons qui paraissent dépourvus de cette qualité spéciale qui permet de les utiliser en musique, et dont l'oreille ne saurait trouver la place dans l'échelle musicale. Cette impossibilité est généralement attribuée à ce que le bruit serait un phénomène pour ainsi dire instantané, ou aurait du moins une très-courte durée. Mais, d'une part, les musiciens emploient souvent des sons d'une durée extrêmement courte; d'autre part, en écoutant des bruits successifs et d'une nature analogue, l'oreille peut saisir entre eux les mêmes rapports que ceux auxquels donnent naissance les sons musicaux proprement dits. Ainsi, qu'on laisse tomber sur un parquet une petite lame rectangulaire de bois, il se produit un cliquetis particulier qui n'a aucun caractère musical. Mais si on fait l'expérience avec sept morceaux de bois de même largeur, de même épaisseur, mais de longueurs différentes, l'oreille entend très-distinctement les sept notes de la gamme. Plusieurs instruments employés souvent dans les orchestres, le tambour, les cymbales, produisent de véritables bruits.

Certains bruits se prolongent souvent pendant un temps considérable, sans que pour cela l'oreille devienne plus apte à y constater ou à en saisir la valeur musicale; tel est, par exemple, le bruit d'une voiture qui roule sur le pavé, le grondement des vagues de la mer, le bruissement des feuilles, le murmure d'un ruisseau, le mugissement du vent qui s'engouffre dans les cheminées, etc. Dans

ces diverses circonstances, le bruit paraît résulter de la coexistence de différents sons qui se succèdent les uns aux autres sans aucune régularité, ou qui présentent un caractère plus ou moins marqué de dissonance. Des expériences dont nous dirons quelques mots plus loin ont permis de faire, pour ainsi dire, l'anatomie des divers bruits que nous venons de mentionner, et de reconnaître leurs éléments constitutifs formés souvent par des sons ayant un caractère musical prononcé, mais ne présentant, ni dans leur association ni dans leur ordre de succession, aucune règle. Qu'on écoute avec attention un orchestre, on pourra distinguer et suivre le jeu de chacun des divers instruments qui le composent, leurs effets sur l'oreille se superposeront pour ainsi dire sans se troubler. Mais que chacun des artistes vienne à produire sur son instrument des notes purement arbitraires, l'oreille percevra distinctement, indépendamment des sons particuliers qui pourraient arriver jusqu'à elle, un bruit général d'un caractère propre. Cet effet distinct et résultant d'ébranlements individuels se manifeste d'une façon remarquable dans diverses circonstances. Ainsi, dans une salle où parlent à la fois un très-grand nombre de personnes, au-dessus de tous ces bruits particuliers domine une sorte de murmure général très-nettement perceptible. De même, si on monte sur un endroit élevé dans l'intérieur d'une grande ville animée et bruyante, sur le sommet du Panthéon à Paris par exemple, l'oreille est frappée par un roulement grave et continu, c'est comme la voix même de la ville, sorte de résultante de tous les phénomènes sonores qui se produisent dans son intérieur, et dont plusieurs, en dehors de cette participation à l'effet général, n'auraient pu faire sentir leur effet particulier.

Il résulte de tout ce qui vient d'être dit que les phénomènes sonores sont toujours le résultat d'un ébranlement périodique d'un corps. Cet ébranlement peut avoir une durée plus ou moins grande, il peut être plus ou moins simple, mais sa nature physique est indiscutable.

631. Véhicule du son. — Le son n'est pas un être particulier; c'est une impression sur l'organe de l'ouïe, impression occasionnée par l'état vibratoire d'un corps. Mais l'existence d'un corps vibrant

d'une part et de l'oreille de l'autre ne suffit point pour déterminer l'impression, il faut qu'un rapport s'établisse entre le corps et l'organe : cela se fait par l'intermédiaire d'un milieu pondérable. Ce milieu peut être quelconque, solide, liquide ou gazeux ; toutefois il doit être constitué par une matière plus ou moins élastique. Si on suppose un corps vibrant dans un espace absolument vide ou au sein d'un milieu complétement dépourvu d'élasticité, l'oreille placée à une certaine distance ne perçoit, n'entend aucun son ; le son dans le sens propre du mot n'existe pas.

On justifie cette proposition par les expériences suivantes :

1° On dispose sous le récipient de la machine pneumatique un timbre à rouages A (fig. 570) que l'on peut mettre en mouvement de l'extérieur à l'aide du levier *g*. On le place sur un petit coussinet de ouate ou de toute autre matière très-peu élastique, et on raréfie l'air dans la cloche. Lorsqu'on a fait le vide aussi complétement que le permet la machine, on met en mouvement le rouage, on voit celui-ci marcher, le marteau retomber sur le timbre, et pourtant l'oreille n'entend pas de son, ou du moins elle n'en entend qu'un d'une très-faible intensité. Si on laisse rentrer graduellement l'air, le son prend une intensité graduellement croissante, et on doit évidemment conclure que si on pouvait faire un vide absolu et trouver un support strictement non élastique, il n'y aurait rigoureusement pas de son produit.

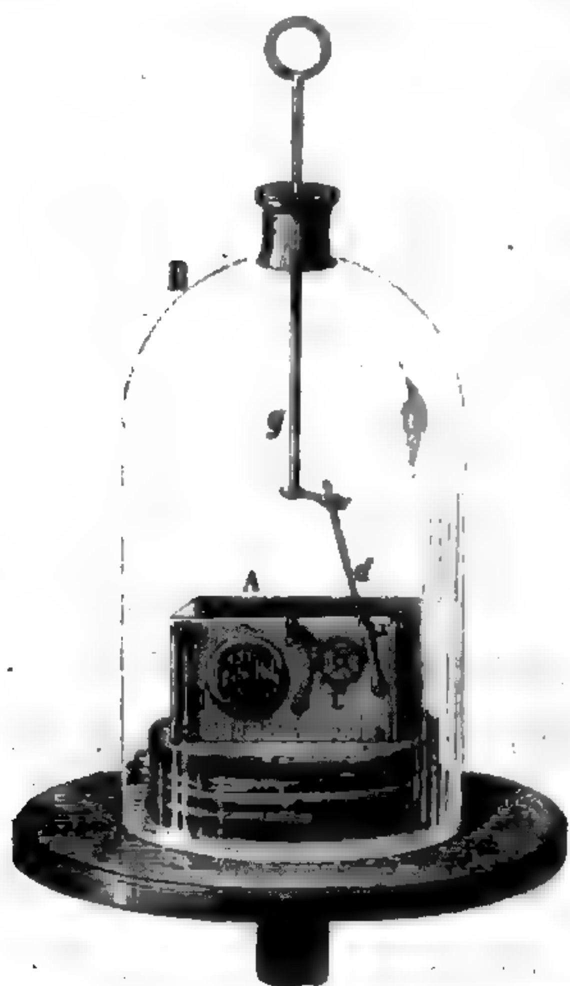


Fig. 570. — Son dans le vide.

2° On peut se servir d'un ballon à robinet (fig. 571), dans l'intérieur duquel est suspendue par un fil de lin une petite clochette. Si l'on fait le vide dans le ballon, et qu'on l'agite, le son produit par la clochette est à peine perceptible. Ce second mode d'expérience présente quelques avantages : ainsi on peut remplir le ballon de gaz différents ou même de vapeurs saturées ou non, et l'on recon-

naît que dans toutes ces circonstances il se produit un son appréciable, d'où on voit que tous les gaz peuvent servir d'intermédiaires entre le corps vibrant et l'oreille; en d'autres termes, que tous les gaz sont propres à la propagation et à la transmission du son.

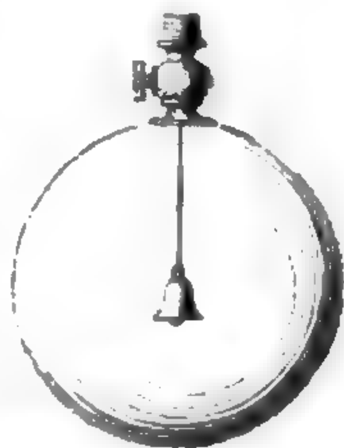


Fig. 571.
Ballon à robinet.

Les liquides transmettent aussi le son, c'est ce dont il est facile de s'assurer par des expériences directes. Mais ces expériences sont à peine nécessaires s'il ne s'agit que de constater le fait, car un grand nombre d'animaux vivant dans l'eau sont pourvus d'un appareil auditif compliqué, et plusieurs ont l'ouïe très-fine.

Quant aux solides, non-seulement ils transmettent les sons, mais des faits bien connus établissent qu'ils sont des organes de transmission très-délicats. Ainsi, par exemple, que deux personnes se placent aux extrémités d'une poutre, et que l'une d'elles donne, avec une tête d'épingle, quelques petits coups secs, l'autre personne, appliquant l'oreille contre la poutre, les entendra distinctement, tandis qu'elle ne les entendrait pas directement, l'oreille restant dans l'air. On fait quelquefois cette expérience pour s'assurer si une poutre est saine; elle ne réussit bien, en effet, que dans ce cas. Lorsque dans l'intérieur il y a une décomposition plus ou moins avancée, la substance qui en est le résultat est généralement molle et peu élastique, ce qui la rend peu propre à la transmission du son.

Le stéthoscope est fondé sur la transmission du son à travers les solides; c'est un cylindre de bois dont on applique l'une des extrémités à la surface de la poitrine, tandis qu'on applique l'oreille à l'autre extrémité. On parvient ainsi à entendre différents bruits, tels que les bruits du cœur, ceux qui résultent du mouvement de l'air dans les bronches, etc. L'auscultation simple elle-même, qui consiste à appliquer directement l'oreille à la surface du corps, est fondée sur le même principe, puisque les bruits qu'il s'agit de percevoir se transmettent à travers les parois de la cavité thoracique.

On sait qu'en appliquant l'oreille contre terre on entend beaucoup plus distinctement des bruits lointains. S'il fallait avoir une

entière créance aux divers récits qui ont été faits sur ce point, les sauvages parviendraient à tirer de cette sorte d'auscultation du sol les conclusions les plus précises sur la marche d'un corps ennemi, le nombre des hommes qui le composent, la distance à laquelle il se trouve, etc. On peut donc, en résumé, tirer de tout ce qui précède la définition suivante du son :

Le son est une impression produite par les vibrations d'un corps, transmises jusqu'à l'organe de l'ouïe à l'aide d'un milieu pondérable et élastique quelconque.

632. Vitesse du son dans l'air. — Cette propagation du son dans un milieu se fait par un mécanisme particulier que nous examinerons plus loin; elle demande naturellement un certain temps, et sa vitesse n'est même pas très-considérable. Ainsi, lorsqu'on voit à une certaine distance un chasseur tirant un coup de fusil, ce n'est que quelques instants après l'apparition de la lumière qu'on entend le bruit de l'explosion. L'intervalle qui sépare ces deux phénomènes mesure le temps que le son a mis à parcourir la distance des deux points, car on peut considérer comme absolument nul le temps que la lumière met à franchir la même distance.

C'est en réalité par des expériences analogues que l'on a mesuré la vitesse du son dans l'air. Les premières mesures exactes ont été effectuées en 1738, par une commission de l'Académie des sciences, dans laquelle se trouvaient Lacaille et Cassini de Thury. Des pièces de canon avaient été installées à Montlhéry et à Montmartre, et on était convenu qu'à partir d'une certaine heure, des coups seraient tirés à des intervalles de temps égaux; les observateurs de chaque station mesuraient le temps écoulé entre l'apparition de la lumière et l'arrivée du bruit. Cette durée fut trouvée en moyenne de 1 minute 24 secondes pour une distance de 29,000 mètres environ, ce qui donne une vitesse d'à peu près 337 mètres par seconde. Il est important dans ces expériences de croiser les feux afin d'éliminer l'influence du vent qui augmente ou diminue la vitesse de propagation, suivant qu'il souffle dans le même sens ou en sens contraire. D'autres observateurs, placés à Fontenay-aux-Roses et à L'Haÿ, mesuraient aussi le temps que le son employait pour leur parvenir; ce temps est précisément proportionnel aux

distances respectives des stations, ce qui prouve que le son se propage d'un mouvement uniforme.

Ces expériences furent répétées en 1822 par le Bureau des longitudes; les observateurs étaient Arago, Gay-Lussac, de Humboldt, de Prony, Bouvard et Mathieu. On choisit pour stations Montlhéry et Villejuif, distants de 18,613 mètres, et on trouva, à la température de 15°, pour la vitesse de transmission, 340 mètres par seconde.

Un grand nombre d'expériences du même genre ont été exécutées dans différents pays. Tout récemment M. Regnault s'est occupé du même sujet en utilisant toutes les ressources de la physique moderne et particulièrement les signaux télégraphiques pour l'enregistrement de l'instant du coup de feu et de l'arrivée du son. Il paraît résulter de l'ensemble de ces expériences que dans l'air sec, tranquille et à la température de zéro, la vitesse du son est de 331 mètres par seconde. La température a une influence très-marquée sur cette vitesse; ainsi à T° en général, la vitesse est sensiblement égale à $331\sqrt{1 + \alpha T}$, α étant le coefficient de dilatation de l'air. Pour des parcours peu étendus, la vitesse croît aussi sensiblement avec l'intensité de l'ébranlement. On a remarqué encore que quand le parcours devient très-long, il y a une légère diminution de vitesse moyenne, mais la différence est de peu d'importance.

633. Formule théorique. — En appliquant les lois théoriques de la propagation du mouvement vibratoire dans un milieu gazeux, on a trouvé pour la vitesse théorique de la propagation du son dans l'air à la température de zéro :

$$V = \sqrt{g \cdot \frac{mh}{d} \cdot \frac{c}{c'}}.$$

g est l'accélération de la pesanteur, h la hauteur du baromètre, m le poids de l'unité de volume du mercure à zéro, d le poids de l'unité de volume de l'air à zéro et sous la pression h; $\frac{c}{c'}$ est le rapport du calorique spécifique à pression constante au calorique spécifique à volume constant (347). Bien que cette formule soit établie en se

fondant, au sujet de la constitution des gaz, sur des hypothèses qui ne sont jamais qu'imparfaitement réalisées, on peut reconnaître qu'elle donne des résultats sensiblement d'accord avec l'expérience.

634. Vitesse du son dans les liquides. — La vitesse du son dans l'eau a été mesurée par Colladon et Sturm, en 1826, sur le lac de Genève. Deux barques étaient amarrées à une distance de 13,500 mètres. L'une d'elles portait une cloche du poids de 65 kilogrammes qui plongeait dans l'eau. Un battant était mis en mouvement par un levier extérieur disposé de manière à enflammer un petit amas de poudre au moment même où le choc avait lieu. Sur l'autre bateau l'observateur écoutait le son produit en appliquant l'oreille à l'extrémité d'un tube en forme de cône évasé (fig. 572) dont l'orifice, fermé par une membrane, était dirigé du côté d'où venait le son. En notant exactement le moment de l'apparition de la lumière, on pouvait mesurer le temps employé par le son à se transmettre d'un bateau à l'autre. Colladon et Sturm trouvèrent ainsi, pour la vitesse de propagation à la température de 8°, 1,435 mètres par seconde.

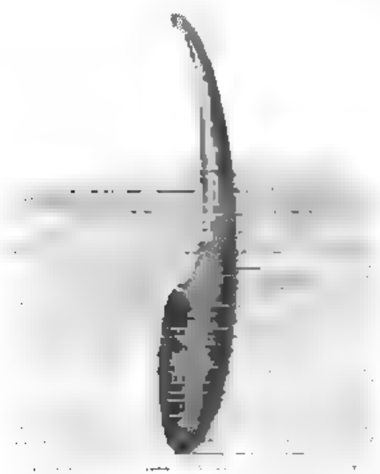


Fig. 572.

La vitesse du son dans un liquide est donnée par une formule analogue à celle qui se rapporte aux gaz :

$$V = \sqrt{\frac{g m \varepsilon}{DH}}.$$

Les lettres g et m ont la même signification que dans la formule du paragraphe (633), ε représente la compression du liquide pour une pression égale à H. En se servant des valeurs trouvées par M. Regnault pour la compressibilité de l'eau, la formule donne pour la vitesse du son dans ce liquide 1,485 mètres. La différence notable qui existe entre ce nombre et le nombre trouvé par Colladon et Sturm s'explique par l'incertitude des méthodes qui servent à mesurer la compressibilité des liquides.

M. Wertheim a mesuré la vitesse du son dans quelques liquides par une méthode indirecte, dont le principe sera exposé plus loin :

il a trouvé 1,160 mètres dans l'éther et l'alcool, 1,900 mètres dans une dissolution de chlorure de calcium.

635. Vitesse du son dans les solides. — La vitesse du son dans la fonte a été déterminée par Biot et Martin en se servant d'un tuyau de conduite d'environ un kilomètre de longueur (951 mètres). L'un des observateurs frappait un petit timbre suspendu à l'une des extrémités de la conduite, l'autre observateur entendait deux sons: l'un, transmis par la fonte, arrivait le premier; l'autre, transmis par l'air, arrivait 2'',5 plus tard. Or, pour parcourir cette distance dans l'air, le son devait employer 2'',85; c'est donc 0'',35 que dure la transmission par la fonte, ce qui fait une vitesse huit fois plus grande environ que dans l'air. Ce résultat est peu exact, à cause de l'hétérogénéité du tuyau, qui présentait de part en part des rondelles de plomb qui devaient influer sur la vitesse de propagation.

MM. Wertheim et Bréguet ont mesuré la vitesse de transmission du son dans les fils télégraphiques du chemin de fer de Versailles; l'un des observateurs frappait, à un moment donné, un coup de marteau sur le poteau, l'autre notait l'instant où il entendait le bruit. Ils ont trouvé ainsi une vitesse de transmission dans le fil de fer de 3,485. Mais il s'est présenté dans le cours de ces expériences des irrégularités singulières qui donnent beaucoup d'incertitude aux résultats obtenus. Les poteaux étant en effet fixés au sol, il est difficile de savoir si c'est par le sol ou par le fil que la transmission se produit, ou s'il y a une sorte de combinaison des deux effets.

Par la même méthode indirecte qu'il a appliquée aux liquides, M. Wertheim a mesuré la vitesse du son dans quelques solides: voici le tableau des résultats obtenus. La vitesse dans l'air est prise pour unité :

Plomb.	3,974 à 4,120	Acier.	14,361 à 15,108
Étain.	7,338 à 7,480	Fer.	15,108
Or	5,603 à 6.424	Laiton.	10,224
Argent. . . .	7,903 à 8,057	Verre.	14,956 à 16,759
Zinc.	9,863 à 11,009	Cristal.	11,890 à 12,220
Cuivre.	11,167	Bois de chêne .	9,902 à 12,02
Platine	7,823 à 8,467	Bois de sapin. .	12,49 à 17,26

636. Formule théorique. — On peut calculer la vitesse du son dans les solides par la formule

$$v = \sqrt{\frac{g}{\varepsilon}},$$

dans laquelle ε représente l'allongement d'une tige de longueur égale à l'unité, sous l'influence d'une traction égale à son poids. Cette quantité peut se déduire aisément de la valeur du coefficient d'élasticité de la substance.

637. Mécanisme de la propagation du son. — Pour nous rendre compte du mode de propagation du son, considérons à l'origine d'un tuyau indéfini une lame vibrante a, et examinons ce qui arrive pendant qu'elle passe de a'' en a'. Nous pouvons



Fig. 573. — Propagation du son.

décomposer le mouvement total en une série de petits mouvements élémentaires; chacun d'eux se communique successivement à la couche d'air voisine qu'elle comprime, celle-ci comprime la suivante en revenant à son état initial, et ainsi de suite successivement. S'il n'y avait qu'un seul de ces mouvements élémentaires, il se propagerait d'une couche à l'autre avec une vitesse de 331 mètres par seconde. Mais ces mouvements se succèdent d'une manière continue; au bout de la première vibration, le premier sera parvenu en A_1 (fig. 574), tandis que le dernier est encore à l'origine du tuyau en A. Sur les différents points de AA_1, les molécules sont en mouvement et ont des vitesses correspondantes à celles qu'avait la lame vibrante aux différents points de son excursion. Ainsi en CC' la vitesse est maxima, comme l'était celle de la lame vibrante au milieu de sa course, en DD' et $D_1D'_1$ les vitesses sont celles de la lame vibrante au quart et aux trois quarts de sa

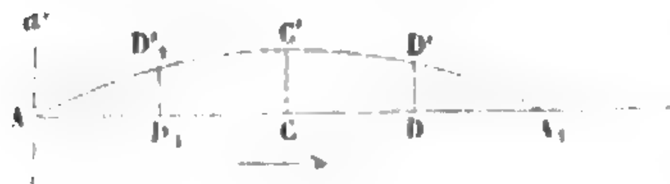


Fig. 574.

course, de sorte que la courbe $AC'A_1$ est une image graphique de la distribution des vitesses. Ces vitesses ont d'ailleurs pour effet de produire une compression de l'air en rapport avec leur grandeur même, de sorte que la même courbe peut représenter l'état relatif de densité de la colonne d'air AA_1 en ses différents points.

Si le mouvement de la lame vibrante s'arrêtait, on se représenterait l'état de l'air dans le tuyau, en supposant que la courbe glisse le long de son axe avec une vitesse de 331 mètres par seconde. Mais la lame revient sur elle-même, elle produit ainsi une raréfaction qui se communique à la couche d'air voisine, et la série de mouvements inverses se communiquant de proche en proche, les couches qui se trouvent du côté de la lame possèdent, quand celle-ci a accompli son mouvement de retour, les diverses vitesses qu'elle a successivement possédées elle-même. En EE' se trouve la vitesse maxima; en FF', $F_1F'_1$ les vitesses du premier et du troisième quart, et comme ces vitesses ont produit une raréfaction, la courbe $AE'A_1$ représente en même temps que les vitesses l'état relatif de dilatation des diverses couches d'air.

Mais pendant le temps que s'est produit l'état de l'air représenté par la courbe $AE'A_1$, les mouvements dus à la première oscil-



Fig. 575.

lation de la lame se sont propagés le long du tuyau et occupent à la fin de la double oscillation l'espace A_1A_2. On voit donc que, lorsque la lame a accompli une vibration complète, les couches d'air situées sur la longueur AA_2 possèdent les diverses vitesses qu'a eues la lame elle-même. Dans la première moitié AA_1, ces vitesses, variables d'ailleurs, sont toutes dirigées dans le sens de la flèche placée au-dessus de la figure. Dans la seconde moitié, ces vitesses sont de sens contraire. La réunion des deux parties AA_1, A_1A_2 forme ce que l'on appelle une onde sonore. Sa longueur AA_2 est égale à l'espace que parcourt le son pendant une vibration complète de la lame. Si,

par exemple, c'est une lame de diapason faisant 870 oscillations simples par seconde, une double vibration durera $\frac{1}{435}$ de seconde, temps pendant lequel le son parcourt $\frac{331^m}{435}$ ou 760 millimètres environ : c'est la longueur de l'onde sonore. Les deux moitiés AA_1, A_1A_2 sont dans un état physique différent, indépendamment du sens contraire des vitesses; la première est dans un état de dilatation, c'est la *demi-onde dilatée;* la seconde est dans un état de condensation, c'est la *demi-onde condensée.* Remarquons encore qu'en deux points tels que F_1 et D_1, E et C, F et D distants l'un de l'autre d'une demi-longueur d'onde, les vitesses de l'air sont exactement égales et de sens contraire.

Si la lame s'arrêtait après une double vibration, le mouvement des couches d'air situées sur AA_2 se propagerait le long du tuyau et on s'en ferait une idée en supposant que la courbe glisse le long du tuyau avec la vitesse de propagation du son. Une tranche d'air atteinte par les diverses parties de la courbe exécutera une vibration complète de même période que celle de la lame et rentrera dans le repos. Mais si la lame continue à vibrer, les couches d'air vibreront elles-mêmes d'une manière continue et de la même façon, seulement chacune d'elles commencera à une époque différente subordonnée à la distance qui la sépare de l'origine de l'ébranlement.

Dans la figure on a distingué par deux teintes différentes les deux demi-ondes; la teinte plus noire correspond à la demi-onde condensée. Il faut imaginer que ces ondes se propagent à raison de 331 mètres par seconde en se régénérant successivement à l'origine, et on aura une idée de la propagation du son dans un cylindre.

638. Propagation dans un milieu indéfini. — Lorsque la vibration sonore se produit dans un milieu indéfini, la propagation se fait dans toutes les directions tout autour du centre d'ébranlement. Les ondes peuvent avoir une forme un peu complexe dans le voisinage du centre, puisque la vibration a une direction unique, mais ces irrégularités disparaissent, et les ondes deviennent promptement sphériques comme si l'ébranlement était constitué par la contraction et la dilatation d'une sphère. La figure 576 représente les ondes sonores sphériques ; on peut les comparer grossièrement aux

ondes circulaires qui se produisent à la surface de l'eau lorsqu'on vient à l'ébranler en un point en y jetant une pierre. Mais ce sont en réalité des phénomènes très-différents. Dans les ondes liquides les molécules sont alternativement soulevées et abaissées par rap-

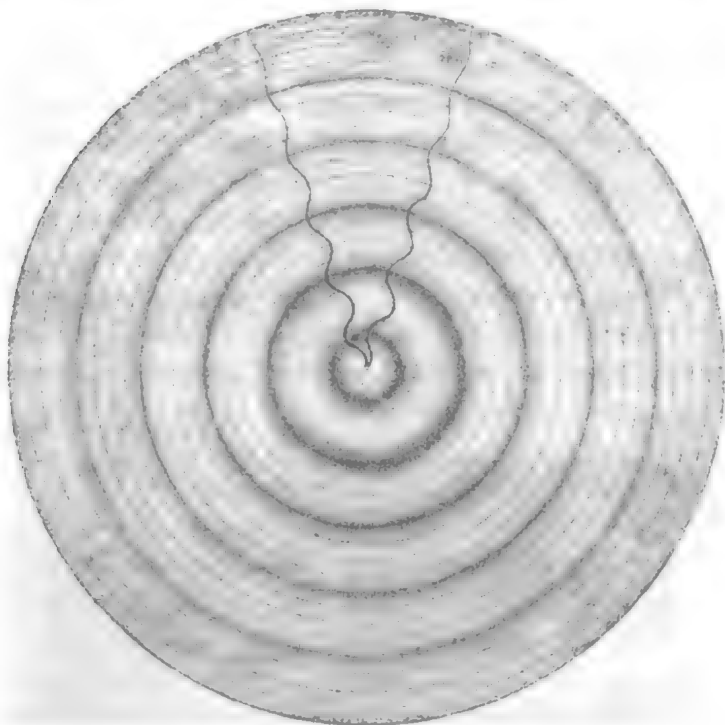


Fig. 576. — Propagation du son dans un milieu indéfini.

port au niveau général, mais elles n'éprouvent aucun changement de densité; ce changement est au contraire caractéristique dans les ondes sonores. Il y a toutefois dans ces deux phénomènes une circonstance commune importante à signaler. L'onde ne produit aucun mouvement véritable de transport; ainsi, quand des ondes liquides se suivent, si l'on observe un petit corps flottant, on le voit alternativement soulevé et abaissé, mais il conserve la même place à la surface. De même dans les ondes sonores les molécules d'air exécutent des mouvements alternatifs dans le sens de la propagation du son, mais le centre de ces mouvements reste invariable.

Il y a entre la propagation du son dans un tuyau et la propagation dans un milieu indéfini une différence essentielle. Dans le premier cas, chaque couche d'air communiquant son mouvement à une couche de même masse, la transmission est complète, et il n'y a d'autre cause de perte que celle qui provient du frottement contre les parois du tuyau. Aussi le son produit dans ces circonstances peut-il être entendu à une distance fort considérable, surtout quand la section est un peu grande [1].

Dans un milieu indéfini, chaque couche communique son mouvement à une masse d'air supérieure à la sienne, il doit donc se produire une diminution d'amplitude dans la vibration et par suite un affaiblissement dans l'intensité du son. La théorie des mouvements vibratoires prouve que l'intensité du son décroît en raison inverse du carré de la distance.

639. Réflexion des ondes sonores. — Lorsque des ondes sonores rencontrent un obstacle fixe, elles se réfléchissent, de sorte



Fig. 577. — Réflexion du son.

qu'il y a deux systèmes d'ondes, l'un direct, l'autre réfléchi, qui se propagent séparément sans se troubler. Si la réflexion a lieu sur une

1. M. Regnault, dans ses expériences sur la vitesse du son, a constaté que, dans une conduite de $0^{m},108$ de diamètre, le son produit par un pistolet chargé de 1 gramme de poudre cesse d'être entendu à 1,150 mètres. Dans une conduite de $0^{m},3$, il faut, pour produire cette extinction, 3,810 mètres. Dans la grande conduite de l'égout Saint-Michel de $1^{m},10$, le son que l'on fait réfléchir plusieurs fois n'est pas éteint après un parcours de 10,000 mètres.

surface plane et que les ondes directes aient pour centre le point O (fig. 578), les ondes réfléchies ont pour centre le point O', symétrique du premier. Une oreille placée en M pourra entendre le son lorsqu'elle sera atteinte par le système d'ondes de retour. On peut appeler rayon sonore la normale aux ondes suivant laquelle le son se propage et qui aboutit à l'oreille; dès lors la ligne OI sera le rayon incident, IM le rayon réfléchi; et puisque les points O et O' sont symétriques, on doit en conclure que le rayon incident et le rayon réfléchi sont également inclinés sur la surface, c'est-à-dire que dans la réflexion du son *l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

640. Circonstances diverses de la réflexion du son. — La réflexion des ondes sonores explique des phénomènes bien connus. Si l'on imagine une sorte de voûte elliptique *ab* (fig. 578) et qu'on produise un ébranlement sonore à l'un des foyers en *f*, les ondes réfléchies d'après la loi de la réflexion auront pour centre le second foyer où elles viendront par conséquent se concentrer et se fermer [1]. Une personne placée en ce foyer pourra donc entendre un bruit très-faible produit en *f*, alors même qu'il sera complétement imperceptible pour des personnes placées plus près. Ce sont sans doute des particularités géométriques plus ou moins analogues à celles-là qui expliquent ce qui a lieu dans la *salle de l'écho* au Conservatoire des arts et métiers de Paris. Deux personnes placées à deux angles opposés de la salle peuvent converser à voix basse sans être entendues par celles qui se trouvent placées dans la partie intermédiaire.



Fig. 578. — Réflexion du son sous une voûte elliptique.

L'expérience des miroirs conjugués (311) peut être répétée pour le son. On suspend à l'un des foyers (fig. 579) une montre. Une personne place son oreille à l'autre foyer, ou mieux encore, afin de ne

1. Si l'on considère, comme dans le paragraphe précédent, les rayons sonores, cette circonstance devient une conséquence immédiate des propriétés géométriques de l'ellipse. On sait, en effet, que dans cette courbe les rayons vecteurs partent des foyers *f*, et aboutissant en un point quelconque *i* ou *i'* de la courbe, sont également inclinés sur la tangente en ce point.

pas intercepter les ondes directes, place à ce foyer le pavillon d'un cornet acoustique (642) à l'aide duquel elle entend distinctement



Fig. 579. — Expérience des miroirs conjugués pour le son.

le bruit du balancier, même quand les miroirs sont à plusieurs mètres de distance.

641. Échos. — C'est la réflexion des ondes sonores qui produit les échos. La présence d'un obstacle, tel qu'un mur ou un bouquet d'arbres, etc., est absolument nécessaire; jamais l'écho ne se produit en rase campagne ou en pleine mer, à moins qu'il n'y ait dans le ciel des nuages qui produisent eux-mêmes la réflexion du son. L'écho peut être monosyllabique quand il ne répète qu'une syllabe, ou polysyllabique quand il en répète plusieurs. On cite des échos qui répètent jusqu'à vingt mots.

Pour que l'écho répète une syllabe, il faut que l'obstacle qui le produit soit placé à une distance telle, que le son ne revienne à l'observateur que lorsqu'il a achevé de prononcer la syllabe. Supposons, ce qui est à peu près exact, que l'articulation d'une syllabe dure 1/5 de seconde, la vitesse du son étant de 331 mètres par seconde, en 1/5 de seconde l'espace parcouru est de 65 mètres, ce qui porte à 32 ou 33 mètres la distance qui doit séparer l'observateur de l'obstacle

pour que l'écho puisse répéter une syllabe. Car les ondes sonores en revenant à l'observateur (fig. 580) ont parcouru la distance OA, puis AO, c'est-à-dire le double de la distance à l'obstacle. Si la distance devient double, triple, quadruple, l'écho pourra répéter deux, trois, quatre syllabes. Lorsque la distance est inférieure à 30 mètres environ, l'écho se confond avec le son direct, ce qui produit une simple résonnance. C'est ce que l'on observe particulièrement sous les voûtes.

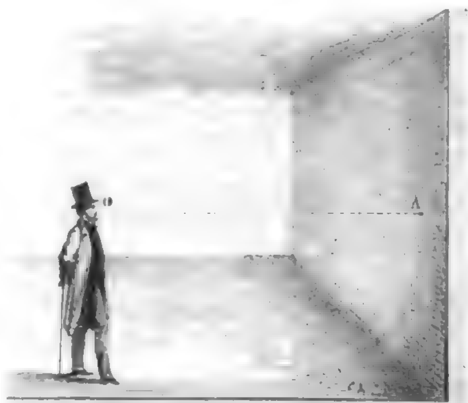


Fig. 580.—Condition physique de la production de l'écho.

Les échos sont quelquefois multiples, c'est-à-dire qu'ils répètent plusieurs fois le son. L'un de ceux qui ont été le plus souvent cités est celui du château de Simonetta, près de Milan, qui, suivant Kircher, répète jusqu'à quarante fois. Les échos multiples sont dus certainement à la présence de plusieurs obstacles qui se renvoient successivement le son, de même qu'entre deux glaces parallèles la réflexion successive des rayons lumineux donne lieu à une série d'images; mais il n'est pas toujours facile de se rendre compte *à priori* de l'effet produit par les obstacles, et souvent on n'observe aucun écho où au premier abord paraissent pleinement réalisées les conditions de sa production.

On observe assez souvent des échos appelés *toniques*, qui présentent la propriété curieuse de modifier le timbre du son. Très-fréquemment l'écho a quelque chose de plaintif; il est assez difficile d'assigner la cause de cette singulière particularité.

642. Porte-voix. — Cornet acoustique. — C'est sans doute à la réflexion des ondes sonores que doivent être attribués les effets du porte-voix et des cornets acoustiques.

Le porte-voix (fig. 581) est un tube conique d'une longueur qui peut aller jusqu'à 2 mètres, muni à l'une de ses extrémités d'une embouchure qui peut s'appliquer sur la bouche sans gêner le mou-

vement des lèvres. A l'autre extrémité est un pavillon évasé d'environ $0^{m},50$ d'ouverture. Ces instruments, très en usage surtout à bord des navires, donnent aux sons un degré remarquable de renforcement, et il est assez difficile, à vrai dire, de donner de ce fait une explication bien précise. On suppose ordinairement que la forme conique du tube a pour effet de rapprocher de plus en plus les rayons sonores de l'axe et de donner lieu ainsi à une plus grande intensité de l'ébranlement. Mais suivant cette théorie le pavillon serait inutile, et l'expérience prouve qu'il a au contraire une très-grande influence.

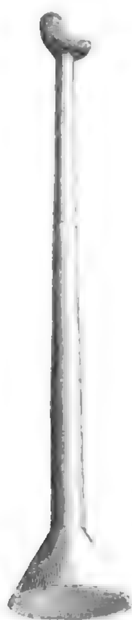


Fig. 581. Porte-voix.

Les mêmes difficultés se rencontrent dans l'explication des effets produits par les cornets acoustiques. La forme de ces appareils varie beaucoup, comme on peut le voir par les différents modèles représentés dans la figure 582. La seule condition générale, c'est que le pavillon extérieur soit plus large que la partie que l'on introduit dans l'oreille. On introduit quelquefois dans l'intérieur du cornet de minces membranes en baudruche qui occupent les positions des lignes ponctuées dans les systèmes 4 et 5. Le système 6 est composé simplement d'une capsule formant pavillon et fermée par une mince membrane : elle communique avec l'oreille par un tube en caoutchouc muni d'un bout en ivoire. L'utilité des membranes dans ces divers appareils résulte de ce que ces corps sont sensibles à des vibrations extrêmement faibles et souvent directement imperceptibles par l'oreille. Ainsi nous avons cité plus haut les dis-

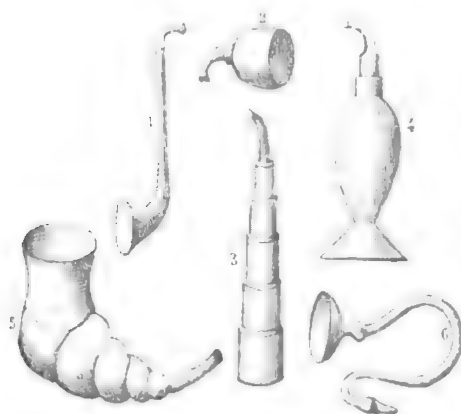


Fig. 582. — Cornets acoustiques.

tances auxquelles un son cesse d'être entendu dans un tuyau; bien au delà de ces distances les membranes sont impressionnées encore d'une manière parfaitement appréciable.

643. Interférences du son. — On désigne sous le nom d'*interférences du son* le phénomène qui se produit dans la rencontre de deux ondes sonores et qui donne lieu quelquefois à une diminution notable du son, ou même au silence. Ce phénomène, un peu paradoxal au premier abord, s'explique avec la plus grande facilité, une fois connu le mécanisme de la propagation du son. Il résulte, en effet, des explications données dans le § 637 que les molécules d'air ou de tout autre véhicule du son exécutent un mouvement vibratoire de même période que le corps sonore lui-même, mais ce mouvement commence plus ou moins tôt, suivant la distance, de sorte qu'à un moment donné sur une certaine ligne partant du centre d'ébranlement les diverses molécules sont dans des phases de vibration différentes. Or, on peut concevoir qu'en un même point arrivent deux mouvements vibratoires de même période, mais dont la phase ne soit pas la même : la molécule atteinte par ces deux mouvements prendra une vitesse qui sera la résultante des deux impulsions particulières qu'elle reçoit. Si, par exemple, ces deux vitesses étaient égales et contraires, la molécule serait réduite strictement au repos, et en ce point le silence résulterait de l'addition de deux phénomènes sonores.

Ces conditions physiques peuvent se réaliser de diverses façons. On fait vibrer une plaque à la manière ordinaire, et on dispose au-dessus d'elle un tube bifurqué dont une des branches a son extrémité en regard d'une portion vibrante de la plaque : le son éprouve un renforcement notable, par suite de la vibration concomitante de l'air du tuyau. Mais si l'on place les deux branches en regard de portions de la plaque vibrant en sens contraire, le renforcement est nul. Cela tient à l'interférence, dans le corps même du tuyau, des mouvements vibratoires inverses qui pénètrent dans chacune des bifurcations. Ce mode d'expérimentation est dû à M. Wheatstone.

Les conditions de l'interférence sont réalisées d'une manière plus directe dans l'expérience suivante due à M. Desains. On se sert

d'une caisse de bois dont la face inférieure est percée d'une ouverture destinée à recevoir un fort sifflet. Sur la face supérieure se trouvent deux ouvertures plus larges et placées symétriquement par rapport à l'ouverture inférieure. Les parois intérieures sont garnies de ouate, afin d'annuler à peu près l'effet des réflexions intérieures. Dans ces conditions, si l'on fait sonner le sifflet et qu'on promène une petite membrane recouverte de sable dans les différents points du plan vertical situé entre les deux ouvertures, on voit le sable s'agiter et produire des lignes nodales à droite et à gauche. Mais si l'on s'écarte dans le plan perpendiculaire, on trouve des endroits symétriquement placés et où le mouvement du sable est à peine sensible. Si alors on ferme une des ouvertures, le sable s'agite de nouveau, ce qui prouve bien que c'est à l'influence réciproque des deux mouvements vibratoires que doit être attribuée la destruction de vitesse.

On obtient un résultat analogue, mais plus marqué, à l'aide de l'expérience suivante due à M. Lissajous. Au-dessus et à une petite distance d'une plaque vibrante circulaire, on place un disque de carton ou de zinc recouvert de drap, et formé de 10 secteurs alternativement pleins et évidés. On fait vibrer la plaque en l'attaquant de façon qu'elle se divise en 10 secteurs et on dispose le disque mobile de manière à couvrir exactement les secteurs correspondants de la plaque vibrante. Les mouvements vibratoires susceptibles d'interférer se trouvent ainsi arrêtés, et le son éprouve un renforcement très-intense. Si l'on tourne le disque de manière que chaque secteur évidé couvre les moitiés des deux secteurs contigus, le renforcement n'a plus lieu. Si l'on fait tourner rapidement le disque, il se produit une série successive de renforcements donnant lieu à des espèces de battements très-distincts.

C'est par suite d'une circonstance analogue à celle qui se produit dans les deux expériences précédentes que, si l'on se place au centre d'une cloche que l'on ébranle, on ne perçoit qu'un son médiocrement intense, alors même qu'à une petite distance des bords cette intensité est presque intolérable.

644. Interférences de l'onde directe et de l'onde réfléchie. — L'interférence peut se produire entre l'onde directe et l'onde

réfléchie. Pour nous en rendre compte, rappelons que, d'après l'analyse que nous avons faite de la propagation du son au § 637, deux couches d'air situées à une distance d'une demi-longueur d'onde ont des vitesses égales et contraires. Supposons d'après cela qu'en un certain point l'onde rencontre un obstacle fixe, un plan par exemple, perpendiculaire à la direction que l'on considère, l'effet de cet obstacle est de donner aux molécules choquantes une vitesse exactement contraire à celle qu'elles possèdent. Cette vitesse se transmet successivement en arrière de l'obstacle et donne lieu à l'onde réfléchie. Considérons d'après cela une tranche située à une demi-longueur d'ondulation de l'obstacle, elle est soumise à l'action de deux vitesses, l'une qui provient de l'onde directe et l'autre qui provient de l'onde réfléchie. Or, ces deux vitesses sont égales et contraires. En effet, la vitesse due à l'onde incidente est égale et contraire à celle de la tranche placée près de l'obstacle, et la vitesse due à l'onde réfléchie est égale et contraire à celle que la réflexion imprime à la même tranche. La couche d'air que nous considérons est donc animée de deux vitesses égales et contraires, et par suite elle restera en repos. Il en sera de même de tous les points espacés d'une demi-longueur d'ondulation. Ces points sont appelés des nœuds; il s'en trouve un évidemment à l'obstacle fixe lui-même. Au milieu de l'intervalle entre les nœuds, les vitesses, au lieu de se détruire, s'ajoutent. Ce sont les ventres de vibration. Il est essentiel de remarquer que, par suite de l'opposition même des vitesses dans les nœuds, la condensation et la dilatation de l'air y sont les plus grandes possible, tandis que dans les ventres la densité de l'air est la même que celle de l'air extérieur.

Des expériences directes de vérification en employant un mur comme surface réfléchissante ont été faites par Savart et Seebeck. Ce dernier savant utilisait, pour constater la place des nœuds, un petit appareil très-sensible, connu sous le nom de pendule acoustique. Il se compose essentiellement d'une petite membrane tendue dans une monture à laquelle est fixée l'extrémité d'un petit pendule très-léger; la boule vient s'appuyer sur le centre de la membrane. Dans les ventres de vibration, le mouvement vibratoire de la membrane se communique au pendule qui est

repoussé, tandis qu'il demeure à peu près immobile dans les nœuds.

C'est à l'aide d'un pendule acoustique que M. Regnault a exécuté un grand nombre de ses expériences sur la vitesse du son ; au moment où la membrane était ébranlée, le pendule mis en mouvement établissait un contact électrique, qui produisait l'enregistrement de l'instant où arrivait le son.

La longueur des ondes sonores est liée à la vitesse du mouvement vibratoire, ou à ce que l'on appelle la hauteur du son. Si dans les expériences précédentes on se sert de phénomènes sonores qui soient le résultat de la superposition de plusieurs sons, les ventres correspondants à chacun d'eux auront des positions particulières. En ces points l'oreille pourra constater la présence de ces sons élémentaires, dont l'influence aura quelque chose de prédominant, alors même que dans le phénomène total elle ne puisse pas les distinguer. C'est par des expériences de ce genre qu'on a pu constater dans certains bruits la coexistence de sons ayant par eux-mêmes une valeur musicale (630).

CHAPITRE LIV.

ÉVALUATION NUMÉRIQUE DES SONS.

645. Qualités du son. — Les différents sons se distinguent les uns des autres par des qualités spécifiques, qui sont l'intensité, la hauteur et le timbre.

Intensité. — L'intensité du son est la force avec laquelle l'organe de l'ouïe se trouve impressionné. Un son est plus intense qu'un autre lorsqu'il est perceptible à une plus grande distance. On montre aisément, par les expériences indiquées dans le commencement du chapitre précédent, que l'intensité du son dépend de l'amplitude du mouvement vibratoire; il suffit, en effet, d'augmenter cette amplitude pour reconnaître que le son acquiert une intensité plus grande. La mesure de l'intensité du son, considérée dans le mouvement vibratoire qui en est l'origine, est une question de mécanique, qui se résout par les principes généraux des forces vives; mais si on considère le son comme une sensation spéciale, on doit reconnaître que l'organe qui la reçoit est très-peu propre à en comparer l'intensité d'une manière un peu précise. Il est certes facile d'affirmer que le bruit produit par une pièce de canon est très-supérieur à celui d'un coup de pistolet, mais apprécier le rapport de ces deux effets mécaniques est une opération à peu près impossible. L'expérience que l'on pourrait faire à ce sujet consisterait à mesurer les distances auxquelles deux sons déterminés s'éteignent sensiblement. En admettant *à priori* la loi de la variation en raison inverse du carré des distances, on pourrait dire qu'un son qui s'éteint à une distance double est quatre fois plus intense.

Hauteur. — La hauteur ou la *tonalité* d'un son est cette qualité spéciale que l'oreille est susceptible de sentir, toujours à un certain degré, quelquefois avec une merveilleuse précision, et qui est le fondement de l'application des sons à la musique. La hauteur dépend exclusivement du nombre de vibrations exécutées par le corps sonore et par les molécules du milieu qui transmet le son; lorsque le nombre de vibrations augmente, le son devient plus *aigu ;* il devient plus *grave,* au contraire, lorsque le nombre de vibrations diminue.

La hauteur est entièrement indépendante de l'intensité; si l'on ébranle à peine une corde en la pinçant avec le doigt, elle rend un son faible; si on l'écarte davantage, le son devient plus intense, mais dans les deux cas la hauteur est la même.

Timbre. — Le timbre est cette qualité qui fait qu'indépendamment de la hauteur et de l'intensité, deux sons se distinguent l'un de l'autre. C'est ainsi qu'on distingue le son du violon de celui d'une flûte, qu'on reconnaît les diverses personnes à leur voix, etc. Nous indiquerons plus loin les causes physiques du timbre.

646. Intervalles musicaux. — Lorsque deux sons se font entendre, ou simultanément ou successivement, l'oreille éprouve une impression d'une nature toute spéciale due à ce que l'on appelle l'intervalle musical des deux sons. Cette impression ne dépend pas de la hauteur absolue des sons, mais seulement du rapport particulier qui existe entre eux. Ainsi, quand deux sons sont à l'*octave* l'un de l'autre, l'impression propre de l'octave est la même, quel que soit le degré d'acuité ou de gravité des deux sons.

Au point de vue physique, l'intervalle musical est déterminé par le rapport des nombres de vibrations des sons constituants. Ainsi, un son est à l'*octave grave* d'un autre, quand il est constitué par un mouvement vibratoire deux fois plus lent; inversement, il est à l'*octave aiguë,* quand il résulte d'un mouvement vibratoire deux fois plus rapide.

La musique est l'art de combiner les sons de façon à produire une émotion comparable à celle qui résulte d'une œuvre artistique quelconque; elle a recours, pour atteindre ce but, à toutes les

ressources que fournissent les propriétés physiques des corps vibrants; l'intensité des sons, le timbre des divers instruments jouent donc un rôle évident dans une composition musicale; toutefois on peut dire que ce n'est qu'un rôle de second ordre. Le fond de l'art musical consiste dans l'emploi des intervalles musicaux. Par une expérience qui remonte sans doute à l'origine du monde, on a reconnu que les intervalles qu'il est possible d'utiliser sont en réalité peu nombreux; ils sont contenus dans une échelle de sept sons, connue sous le nom de *gamme* [1].

647. Gamme. — La gamme est formée d'une série de sept sons allant du grave à l'aigu, ou de l'aigu au grave, contenus entre deux sons extrêmes dont l'un est à l'octave aiguë ou grave de l'autre.

Voici les noms des notes de la gamme, dite *gamme majeure* :

Noms français.	*ut* ou *do*	*ré*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	ut_2.
Noms anglais et allemands.	C	D	E	F	G	A	B ou H	C.

En comparant la note la plus grave ou la tonique aux différents sons de la gamme, on a divers intervalles employés en musique. Ces intervalles portent les noms suivants :

ut à *ut*.	unisson.	*sol* à *ut*.	quinte.
ré à *ut*.	seconde.	*la* à *ut*.	sixième.
mi à *ut*.	tierce.	*si* à *ut*.	septième.
fa à *ut*.	quarte.	ut_2 à *ut*.	octave.

Par la combinaison de la méthode expérimentale et du calcul, on a déterminé les rapports des nombres de vibrations qui caractérisent ces divers intervalles; ces rapports sont exprimés dans le tableau suivant, dans lequel le nombre de vibrations correspondant à la note *ut* est représenté par 1 :

ut	*re*	*mi*	*fa*	*sol*	*la*	*si*	*ut*
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

1. Le mot *gamme* vient de la lettre grecque *gamma*, ajoutée vers le XI[e] siècle, et employée pour désigner la note du *la* grave du violoncelle, qui commençait alors la série des notes employées A, B, C, D, E, F, G. On prit le Γ grec pour ne pas troubler la suite des lettres déjà employées. Le *gamma* commençant alors la série des sons, on a donné à cette série le nom de *gamme*.

L'exactitude de ces nombres peut être considérée comme absolue; ils résultent d'expériences infiniment variées et qui se sont rectifiées successivement les unes par les autres. Si l'on prend le rapport du nombre de vibrations de chaque note à celui de la note précédente, on obtient les nombres suivants :

De *ré* à *ut*	$\frac{9}{8}$	De *la* à *sol*	$\frac{10}{9}$
De *mi* à *ré*	$\frac{10}{9}$	De *si* à *la*	$\frac{9}{8}$
De *fa* à *mi*	$\frac{16}{15}$	De *ut* à *si*	$\frac{16}{15}$
De *sol* à *fa*	$\frac{9}{8}$		

L'intervalle $\frac{9}{8}$, qui est la seconde majeure, s'appelle un *ton majeur*. L'intervalle $\frac{10}{9}$ est un *ton mineur*. Le rapport entre le ton majeur et le ton mineur est $\frac{9}{8} : \frac{10}{9} = \frac{81}{80}$. L'intervalle $\frac{81}{80}$ est appelé *comma*. C'est le plus petit de ceux que l'on considère en musique, et on le regarde, en général, comme négligeable. L'intervalle $\frac{16}{15}$ est appelé *demi-ton majeur*.

On voit, d'après ces évaluations, qu'il y a une certaine irrégularité dans la série des sons de la gamme. Ainsi, la gamme majeure est formée de la succession suivante : un ton majeur, un ton mineur, un demi-ton majeur, un ton majeur, un ton mineur, un ton majeur, un demi-ton majeur. C'est dans cette succession, telle quelle, que consiste précisément la gamme; la tonique peut avoir tel nombre de vibrations que l'on voudra, mais une fois sa hauteur fixée, celle des autres notes s'en déduit rigoureusement.

La gamme peut être prolongée indéfiniment dans les deux sens; ces diverses gammes se distinguent les unes des autres par un petit chiffre placé au-dessous du nom de la note. Ainsi, en appelant ut_1 $ré_1$..., les notes d'une gamme qui servira de terme de comparaison, les notes ut_2 $ré_2$, ut_3 $ré_3$... désignent les notes correspondantes de la deuxième et de la troisième octave supérieure; ut_{-1} $ré_{-1}$, ut_{-2} $ré_{-2}$... désignent celles de la seconde et de la troisième octave en dessous.

On se sert encore en musique de l'intervalle $\frac{25}{24}$ (dièse ♯) ou de l'intervalle inverse $\frac{24}{25}$ (bémol ♭). On lui donne le nom de *demi-ton mineur*.

Enfin, indépendamment de la gamme majeure ou de ce qu'on appelle le *mode majeur*, on se sert aussi du *mode mineur*, dont les bases sont d'ailleurs un peu moins fixes que celles du mode majeur. Voici un type de gamme mineure avec les intervalles correspondants :

ut		*ré*		*mi*♭		*fa*		*sol*		*la*♭		*si*♭		ut_2
	$\frac{9}{8}$		$\frac{16}{15}$		$\frac{10}{9}$		$\frac{9}{8}$		$\frac{16}{15}$		$\frac{9}{8}$		$\frac{10}{9}$	

Consonnances et dissonnances. — Les intervalles musicaux se divisent en deux classes, les uns formant des consonnances, les autres des dissonnances. Les premiers donnent lieu à une satisfaction propre de l'oreille, qui résulte d'une sorte d'homogénéité de la sensation; les seconds produisent une espèce de tiraillement dans l'organe de l'ouïe, comme s'il était sollicité par des actions contraires. Les intervalles consonnants sont l'unisson, l'octave, la sixte, la quinte, la quarte, la tierce majeure et la tierce mineure $\left(\frac{6}{5}\right)$. Les intervalles dissonnants sont la seconde majeure, le ton mineur, le demi-ton majeur, le demi-ton mineur et le comma.

Il est à remarquer que les consonnances correspondent à des rapports de nombres de vibrations relativement simples. Ces rapports sont les plus simples possible dans ce que l'on appelle l'*accord parfait*.

Accord parfait majeur, *ut, mi, sol*. . . . . $1, \frac{5}{4}, \frac{3}{2}$.

Accord parfait mineur, *ut, mi*♭*, sol*. . . . . $1, \frac{6}{5}, \frac{3}{2}$.

On peut distinguer dans la gamme majeure trois accords parfaits majeurs : *ut, mi, sol*; — *sol, si,* $ré_2$; — *fa, la,* ut_2, et trois accords parfaits mineurs dans la gamme mineure : *ut, mi, sol*; — *sol, si,* $ré_2$; — *fa, la,* ut_2.

648. Gamme tempérée. — Suivant les principes généralement adoptés aujourd'hui en musique, il est convenu que, quelle que soit la note fixe par laquelle on commence, il faut que les autres notes reproduisent la distribution des tons et demi-tons, telle qu'elle a été indiquée plus haut. Si donc on imagine un instrument à son fixe comme le piano, dont les cordes donnent les tons de la gamme naturelle, pour établir cette distribution, quand on commencera par une autre note que l'*ut*, il sera nécessaire d'altérer un peu les notes afin d'avoir la succession naturelle de la gamme. Ainsi, pour commencer la gamme par la note *sol*, on aurait pour les valeurs successives des notes :

sol, la, si, ut, ré, mi, fa ♯, *sol.*

La gamme de *fa* serait :

fa, sol, la, si♭, *ut, ré, mi, fa.*

On voit donc que, pour satisfaire à tous les besoins de la transposition, il faudrait, entre les notes différant d'un ton, introduire deux cordes donnant l'une la note supérieure bémolisée, l'autre la note inférieure diésée, ces deux sons ne coïncidant pas absolument. Mais l'altération produite par le dièse et le bémol n'est elle-même qu'approximative ; on néglige en général un comma. Enfin, si l'on tient compte des exigences assez compliquées du mode mineur, on voit que si l'on voulait avoir des instruments à sons fixes, pouvant donner toutes les notes, même seulement à peu près justes, des diverses gammes, on serait conduit à des combinaisons inextricables. On élude ces difficultés par l'artifice du *tempérament*. La succession des notes de la gamme jusqu'à l'octave forme une série de 12 demi-tons, les uns majeurs, les autres mineurs ; on suppose tous ces demi-tons égaux et calculés de façon à avoir l'octave juste. La valeur de ce demi-ton unique doit par conséquent satisfaire à la relation $x^{12} = 2$, d'où $x = \sqrt[12]{2}$. Cette valeur du demi-ton moyen diffère de moins d'un comma du demi-ton majeur ; on conçoit donc que le tempérament puisse suffire aux diverses exigences musicales. Dans la gamme tempérée, le demi-ton unique repré-

sente le dièse de la note inférieure, ou le bémol de la note supérieure. Ce sont les notes des touches noires du piano.

Le *la* d'orchestre (la_3) a été fixé par décret du 16 février 1859 à 870 vibrations par seconde [1] : c'est le *la tempéré* de l'octave moyenne du piano. On déduit de là le nombre absolu de vibrations des diverses notes.

	Gamme tempérée.	Gamme naturelle.		Gamme tempérée.	Gamme naturelle.
ut_3 . . .	517,3	517,3	*sol* . . .	775,1	776,0
ré. . . .	580,7	582,0	*la*. . . .	870	872,2
mi. . . .	651,8	646,6	*si*. . . .	976,5	970,0
fa. . . .	690,5	689,7	ut_4 . . .	1,034,6	1,034,6

649. Limite des sons employés en musique. — Les sons les plus graves employés en musique sont ceux des tuyaux d'orgue bouchés de 5 mètres environ de longueur (16 pieds) ; ils correspondent à 32 vibrations par seconde. Dans les sons aigus on ne dépasse guère la triple octave du *la* du diapason, ce qui fait $870 \times 2^3 =$ 6960 vibrations par seconde. Au-dessus de cette limite l'oreille se trouve déroutée, mais en procédant de proche en proche on peut réussir à évaluer des sons s'élevant jusqu'à 70 ou 75,000 vibrations par seconde.

La voix humaine, suivant les organisations, peut former des notes placées à différents points de l'échelle musicale, et reportées sur une étendue de deux octaves environ. Le *fa* inférieur de la basse (fa_1) est de 174 vibrations par seconde, le *sol* supérieur du soprano (sol_4) de 1,550 environ, mais ces limites peuvent être beaucoup plus reculées dans quelques voix exceptionnelles.

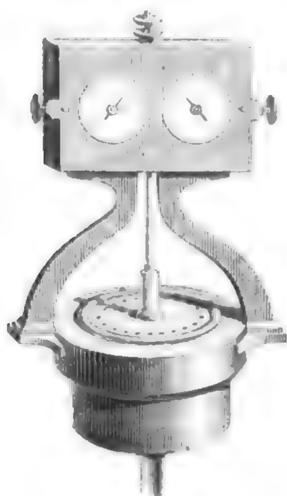
650. Mesure du nombre absolu de vibrations. — La connaissance de la valeur des intervalles musicaux, une oreille suffisamment juste et suffisamment exercée pour distinguer les notes naturelles des notes tempérées, suffisent pour estimer exactement le rapport des nombres de vibrations de deux sons donnés, d'où il suit que si le nombre absolu de vibrations de l'un d'eux est connu, on pourra en déduire le nombre de vibrations du second. Ainsi, par exemple, si on reconnaît qu'un son est à la *quinte aiguë* du *la*

1. Le *la* allemand est de 880 et le *la* anglais de 888 vibrations.

normal, on en conclura qu'il est formé par $\frac{3}{2} . 870 = 1,305$ vibrations par seconde. Lorsque le son que l'on étudie est à une distance un peu trop grande des sons utilisés en musique, on pourra se servir de sons auxiliaires venant graduellement jusqu'au son considéré.

On peut aussi, dans les recherches de cette nature, employer des méthodes proprement physiques que nous allons indiquer succinctement.

651. Sirène. — La sirène imaginée par Cagniard-Latour se compose d'un tambour cylindrique (fig. 583) dont la face supérieure est



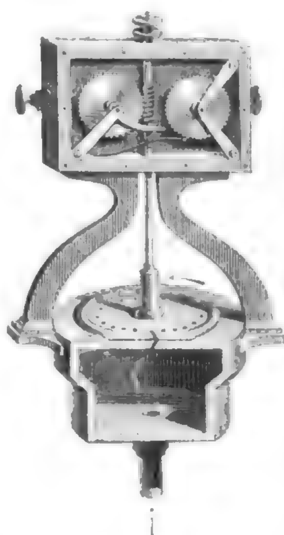


Fig. 583. Sirène. Fig. 584.

percée de 25 trous disposés circulairement. Au-dessus se trouve, à une petite distance, une plaque mobile autour d'un axe passant par le centre de la face supérieure du tambour, elle est aussi percée de 25 trous disposés circulairement. Les ouvertures du tambour et de la plaque mobile ne sont pas perpendiculaires aux faces, elles sont dirigées un peu obliquement, et, comme on le voit sur la figure 584, leurs directions sont inverses. Il résulte de cette disposition que si de l'air arrive dans le tambour par le tuyau placé à la partie inférieure de l'appareil, au moment où les ouvertures

seront en regard, l'air s'écoulera en produisant une impulsion sur les parois des ouvertures de la plaque, qui aura pour effet de mettre celle-ci en mouvement. Par suite de cette rotation, il se produira dans l'air une série de chocs, d'autant plus rapides que la vitesse de rotation sera plus considérable. Il en résultera un phénomène sonore. La sirène peut fonctionner dans l'eau lorsqu'on fait arriver dans le tuyau inférieur de l'eau soumise à une très-forte charge : c'est à cette circonstance qu'est dû le nom de l'instrument.

Lorsque la sirène parle, le nombre de vibrations du son produit est facile à évaluer. En effet, dans un tour du plateau l'écoulement de l'air a lieu 25 fois, et il est 25 fois arrêté ; cela constitue 25 compressions de l'air et 25 dilatations, en tout 50 vibrations simples. Cette remarque permet d'appliquer la sirène à la mesure du nombre de vibrations d'un son donné.

A cet effet la sirène est munie d'un compteur représenté dans la figure 584. L'axe du plateau présente à sa partie supérieure une vis sans fin engrenant avec une roue dentée à 100 divisions, dont l'axe porte une aiguille mobile sur un cadran, cette aiguille marche d'une division par chaque tour du plateau et revient à son point de départ au bout de 100 tours. Une deuxième roue dentée, portant aussi une aiguille, est mise en mouvement par un râteau fixé à la première, de sorte que l'aiguille correspondante marque les centaines de tour. Ajoutons qu'en poussant un bouton placé d'un côté du compteur, on détermine l'embrayage de la vis sans fin et de la roue dentée ; un bouton placé du côté opposé produit le désembrayage.

Cela posé, supposons qu'on veuille mesurer le nombre de vibrations d'un son donné, on place la sirène sur une soufflerie, le compteur étant désembrayé, et on pousse le vent jusqu'à ce que le son produit soit à l'unisson du son donné ; on tâche de maintenir cet unisson pendant quelques instants et on pousse le bouton d'embrayage en même temps qu'on observe un chronomètre. Au moment où on met fin à l'expérience en poussant le bouton de désembrayage, on consulte encore le chronomètre et on a ainsi la durée de l'expérience ; supposons-la égale à T secondes. Pendant ce temps l'aiguille des tours a marché de n divisions et celle des centaines de tours de n', cela fait par conséquent un nombre de

vibrations 50 $(n+100\,n')$ et par conséquent le nombre de vibrations par seconde est $\frac{50\,(n+100\,n')}{T}$. Une sirène de dimensions données ne peut fournir que des sons compris dans des limites assez étroites; pour pouvoir varier les expériences, il faudrait avoir recours à des sirènes de différents modèles, ou bien employer comme Seebeck différents jeux d'ouvertures que l'on peut mettre en action à volonté.

652. Méthode d'inscription graphique. — La sirène, comme compteur de vibrations, est d'une exactitude médiocre, et le principal

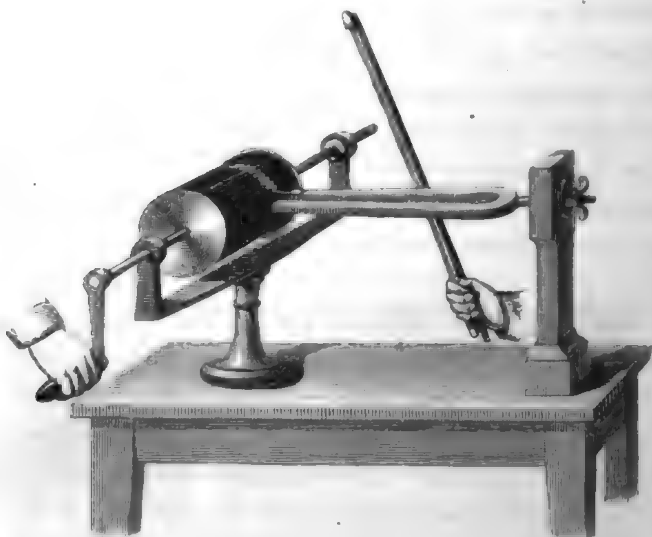


Fig. 585. — Inscription graphique des sons.

intérêt de l'instrument est qu'il fait voir d'une manière directe, pour ainsi dire, la condition physique de la production du son. Les procédés d'inscription graphique très-usités aujourd'hui sont à la fois plus commodes et plus exacts. La figure 585 montre la manière dont on s'y prend pour obtenir le tracé des vibrations d'un diapason. On fixe sur l'une des branches du diapason, avec un peu de cire, un petit style en laiton ou en tuyau de plume. On a, d'autre part, un cylindre mobile autour d'un axe terminé par une manivelle, et à la surface duquel on a collé une feuille de papier légèrement enfumée. On approche le style du papier de manière que le con-

tact soit très-léger, on fait vibrer le diapason et on tourne la manivelle. Le style trace une ligne ondulée sur la surface de la feuille, et si, à l'aide d'un compteur quelconque, on a pu mesurer la durée de l'expérience, il n'y a qu'à compter les sinuosités de la courbe pour avoir le nombre de vibrations effectuées pendant cet intervalle, et par suite le nombre de vibrations par seconde. Cette étude peut se faire à loisir, car il suffit de plonger la feuille dans l'éther, pour que le tracé blanc soit fixé et puisse être conservé indéfiniment. Pour que les traits obtenus pendant une révolution du cylindre ne se confondent pas avec ceux du tour suivant, l'axe du cylindre est fileté et se meut dans un écrou; de cette façon le cylindre progresse parallèlement à son axe, et les tracés forment une sorte de spirale à sa surface. L'appareil porte le nom de *vibroscope*.

Le procédé graphique peut aisément s'approprier à tous les cas, avec de très-légères modifications.

Si l'on veut, par exemple, faire écrire une membrane, on fixe sur celle-ci perpendiculairement un style très-léger, et on l'approche

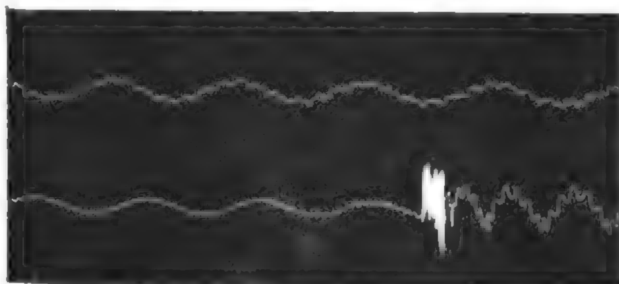


Fig. 586. — Tracés graphiques de vibrations.

du cylindre, de manière que les vibrations soient parallèles à l'axe. C'est sur ce principe qu'est fondé le phonautographe de M. Scott. C'est un appareil formé d'une membrane tendue à l'une des extrémités d'une sorte de grand cornet acoustique. Un style délié fixé sur la membrane écrit sur le cylindre tournant pendant qu'elle est ébranlée par un son produit à l'extrémité opposée du cornet. La figure 586 représente le tracé obtenu par un diapason vibrant, lorsqu'il ne rend qu'un son et lorsqu'il se produit simultanément quelques-uns de ses harmoniques.

653. Méthode des battements. — Lorsque deux sons dans un rapport simple, tels que le son fondamental et sa quinte, par exemple, se font entendre simultanément, l'oreille peut être impressionnée par un son appelé *résultant*, et qui provient de l'accord périodique des ondes sonores composantes. En effet, dans le cas que nous supposons, on voit qu'il y aura accord complet à la fin de deux vibrations du premier son et de trois vibrations du second. Cet accord sera périodique et pourra, par conséquent, engendrer un son particulier. Si on désigne par ut_1 et sol_1 les deux sons donnés, le son résultant sera ut_{-1}. Ce son résultant est très-facile à percevoir dans les tuyaux sonores. Or, si l'on imagine que les tuyaux soient incomplétement accordés, que le premier faisant, par exemple, 512 vibrations, le second en fasse 769 au lieu de 768, qui correspond exactement à la quinte, l'accord ne sera complet qu'au bout d'une seconde, il s'établira et se détruira graduellement, de sorte que, toutes les secondes, l'oreille sera impressionnée par un certain renforcement qui donne lieu à des chocs très-distincts et faciles à compter; s'il y avait une différence de deux, trois, quatre vibrations, on entendrait deux, trois, quatre battements par seconde. On peut constater la réalité de ces renforcements périodiques à l'aide du phonautographe. Les courbes obtenues dans ce cas présentent des ondulations dont l'amplitude est périodiquement variable.

D'après ces remarques, on voit que l'on pourra, par exemple, construire une série de diapasons échelonnés à partir d'un son déterminé, de manière que chacun d'eux donne avec celui qui le suit et celui qui le précède 8 battements par seconde; cela veut dire que les nombres de vibrations croissent ou décroissent de l'un à l'autre de 8 vibrations par seconde.

Le tonomètre de Scheibler, construit par M. Kœnig, se compose de 65 diapasons échelonnés depuis l'*ut* de 512 vibrations à son octave de 1024. Pour déterminer le nombre de vibrations d'un son, il suffira de prendre dans la série des diapasons les deux qui s'en rapprochent le plus au-dessus et au-dessous; en comptant le nombre des battements avec l'un quelconque, on aura immédiatement le nombre de vibrations cherché. Si le son n'est pas

compris dans la gamme du tonomètre, il faudra opérer par octaves croissantes ou décroissantes, jusqu'à ce qu'on obtienne un son contenu dans les limites de l'instrument. La méthode des battements a été indiquée par Sauveur sous la forme suivante : Soient x et y les nombres absolus de vibrations de deux sons; la coexistence de ces sons donnera lieu à des battements dont le nombre sera évidemment égal à la différence de ces nombres mêmes. On a donc, en désignant par a l'intervalle entre les sons donnés et n le nombre de battements par seconde :

$$\frac{x}{y} = a, \qquad x - y = n,$$

équations desquelles on pourrait déduire x et y; mais cette méthode est entièrement inapplicable. En effet, elle résulte de l'appréciation d'un intervalle *altéré*, car le battement est dû à cette altération même, et l'oreille même la plus exercée est très-peu propre à la mesure d'intervalles de ce genre.

CHAPITRE LV.

LOIS DES VIBRATIONS.

654. Diverses sortes de vibrations des solides. — Les vibrations sonores sont des manifestations de l'élasticité. Lorsqu'en effet les molécules des corps sont soumises à l'action des forces extérieures, elles éprouvent un déplacement, et si les forces cessent d'agir, elles reviennent à leurs positions initiales, les dépassent en vertu de la vitesse acquise et exécutent autour d'elles un certain nombre de vibrations isochrones qui sont précisément la condition physique du son. L'isochronisme de ces vibrations est une conséquence nécessaire de la loi indiquée au § 23; elle est d'ailleurs constatée expérimentalement par ce fait que, pendant tout le temps qu'un corps vibre, le son conserve la même hauteur. Suivant le mode d'ébranlement employé pour les solides, on obtient des vibrations d'un système différent. Lorsque l'on agit par voie de compression ou de dilatation, les vibrations prennent le nom de vibrations longitudinales. Les vibrations transversales sont celles qui résultent de la flexion du corps, c'est-à-dire de l'action de forces perpendiculaires à la grande dimension du corps; ces vibrations ne sont accompagnées, en général, d'aucun changement de densité. On peut aussi distinguer les vibrations tournantes résultant d'une torsion de la substance; mais celles ci sont beaucoup moins importantes et ne jouent aucun rôle dans la pratique.

655. Vibrations transversales des cordes. — C'est aux vibrations transversales des cordes que la musique instrumentale emprunte quelques-unes de ses plus précieuses ressources. Dans le

violon, la basse et la contrebasse, les cordes sont ébranlées transversalement à l'aide d'un archet. C'est un faisceau de brins de crin tendus sur une baguette de bois et enduits d'une fine résine appelée colophane. Par l'effet de l'adhérence, les cordes sont entraînées un instant, puis reviennent sur elles-mêmes pour être entraînées de nouveau, ce qui produit comme une série de petits chocs. Dans la harpe, la guitare, les cordes sont pincées directement avec les doigts ; dans le piano, la vibration est déterminée par la percussion d'un marteau. Quel que soit le mode d'ébranlement employé, la hauteur du son produit ne dépend que des éléments constitutifs de la corde elle-même.

656. Lois des vibrations transversales des cordes. — Les géomètres ont appliqué le calcul à l'examen des vibrations transversales des cordes. Traitée d'abord par Taylor d'une manière incomplète, la question fut reprise par d'Alembert, et résolue enfin complétement par Lagrange. La formule suivante contient le résultat de ces diverses recherches :

$$n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}} \qquad (a)$$

n représente le nombre de vibrations simples exécutées dans une unité de temps, r le rayon de la corde, l sa longueur, P sa tension ou le poids tenseur, d sa densité, et π le rapport de la circonférence au diamètre.

On peut déduire aisément de cette formule les lois des vibrations. On voit, en effet, que si la longueur et le rayon de la corde deviennent 2, 3 fois plus grands, le nombre des vibrations devient 2, 3 fois plus petit, et inversement. On peut donc dire que *les nombres des vibrations transversales exécutées par diverses cordes sont, toutes choses égales d'ailleurs, inversement proportionnels à leurs longueurs et à leurs rayons.*

On voit de même que si le poids tenseur devient 4, 9 fois plus considérable, le nombre de vibrations devient 2, 3 fois plus grand ; donc *les nombres de vibrations sont, toutes choses égales d'ailleurs, directement proportionnels à la racine carrée de la tension ou des poids tenseurs.*

Enfin, si la densité devient 4, 9 fois plus grande, le nombre de vibrations devient 2, 3 fois plus petit ; donc *les nombres de vibrations sont, toutes choses égales d'ailleurs, inversement proportionnels aux racines carrées de la densité.*

657. Vérification expérimentale. — Sonomètre. — La vérification expérimentale de ces lois peut se faire à l'aide de l'instrument appelé sonomètre et représenté par la figure 587. Il se compose

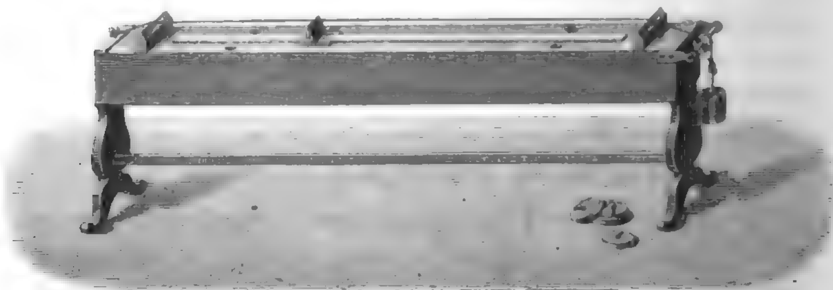


Fig. 587. — Sonomètre.

essentiellement d'une caisse de sapin destinée à renforcer les sons, au-dessus de laquelle on a tendu une ou plusieurs cordes. L'une des extrémités est fixée invariablement ; l'extrémité opposée passe sur une poulie et supporte des poids dont on peut faire varier le nombre et la grandeur. Vers les deux extrémités de la table sont disposés deux chevalets fixes sur lesquels passe la corde et dont la distance détermine la longueur de la partie vibrante. Un chevalet mobile permet de faire vibrer une partie plus ou moins longue de la corde. Veut-on, par exemple, vérifier la loi des longueurs, on fait vibrer la corde dans sa totalité et on écoute avec attention le son produit; on place ensuite le chevalet au milieu et on fait vibrer l'une des moitiés ; le son produit dans ce cas est très-exactement à l'octave aiguë du premier ; il est donc formé par un nombre de vibrations double.

Si l'on fait vibrer la corde entière et les $\frac{2}{3}$, on reconnaîtra distinctement la quinte ; en faisant vibrer successivement les fcrations de longueur $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{8}{15}$, les sons obtenus formeront la

gamme naturelle du son fondamental de la corde considérée comme tonique.

Ce genre de vérification, très-précis d'ailleurs, est toutefois indirect, puisqu'il se fonde sur la connaissance des intervalles musicaux. On peut faire une vérification directe en fixant à la corde un style très-léger, et lui faisant écrire ses vibrations sur le vibroscope. Ce procédé permet d'ailleurs d'opérer avec des longueurs quelconques et qui ne correspondraient pas à un intervalle simple et facile à apprécier.

Les diverses lois des vibrations peuvent être vérifiées par la même méthode. Supposons, par exemple, qu'on veuille étudier l'influence de la densité de la corde : on emploie deux fils, l'un en acier, l'autre en platine, de même diamètre, et on les tend par des poids égaux, à côté l'un de l'autre, sur le sonomètre. En faisant vibrer dans toute sa longueur la portion comprise entre les chevalets fixes, on entend deux sons dont les nombres de vibrations sont à peu près dans le rapport de 3 à 5, c'est-à-dire que le son rendu par le platine a un nombre de vibrations égal aux 3/5 de celui du fer. Ce rapport est sensiblement le même que celui du rapport des racines carrées des densités : la densité du fer est 8, celle du platine filé 22, et le rapport de $\sqrt{8}$ à $\sqrt{22}$ est à peu près celui de $\sqrt{9}$ à $\sqrt{25}$ ou de 3 à 5. Remarquons toutefois que ces lois ne se vérifient exactement que pour des cordes d'un très-petit diamètre et d'une certaine longueur. Les géomètres, en résolvant la question, se sont placés dans l'hypothèse idéale d'un fil infiniment flexible et qui ne peut vibrer qu'autant qu'il est tendu par un poids. En réalité les cordes ont toujours une certaine rigidité, et il est facile de concevoir qu'en donnant à la corde un diamètre suffisant, on puisse rendre les effets de l'élasticité propre, comparables à ceux du poids tenseur. La formule théorique doit donc donner un nombre de vibrations plus petit que celui qui résulte de l'expérience. Pour avoir le nombre de vibrations réel N_1, il faudrait au poids P ajouter le poids p, qui, sur la corde supposée infiniment flexible, produirait le même effet que l'élasticité propre sous l'action d'un poids tenseur.

Ce nombre N_1 serait donné par la formule $N_1 = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P+p}{\pi d}}$.

Or, si on désigne par n le nombre de vibrations dépendant de l'élasticité de la corde, on aura les relations

$$n = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{p}{\pi d}},$$

$$N = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}},$$

d'où

$$N^2 + n^2 = \left(\frac{1}{rl}\right)^2 \frac{P+p}{\pi d} = N_1^2.$$

658. Sons harmoniques. — Lorsqu'on attaque une corde pour la faire vibrer, et qu'on écoute avec attention, on entend, outre le son fondamental, d'autres sons parmi lesquels il est facile de distinguer, en désignant par 1 le son fondamental, les sons 2 et 3, c'est-à-dire l'octave et l'octave de la quinte. Une oreille exercée

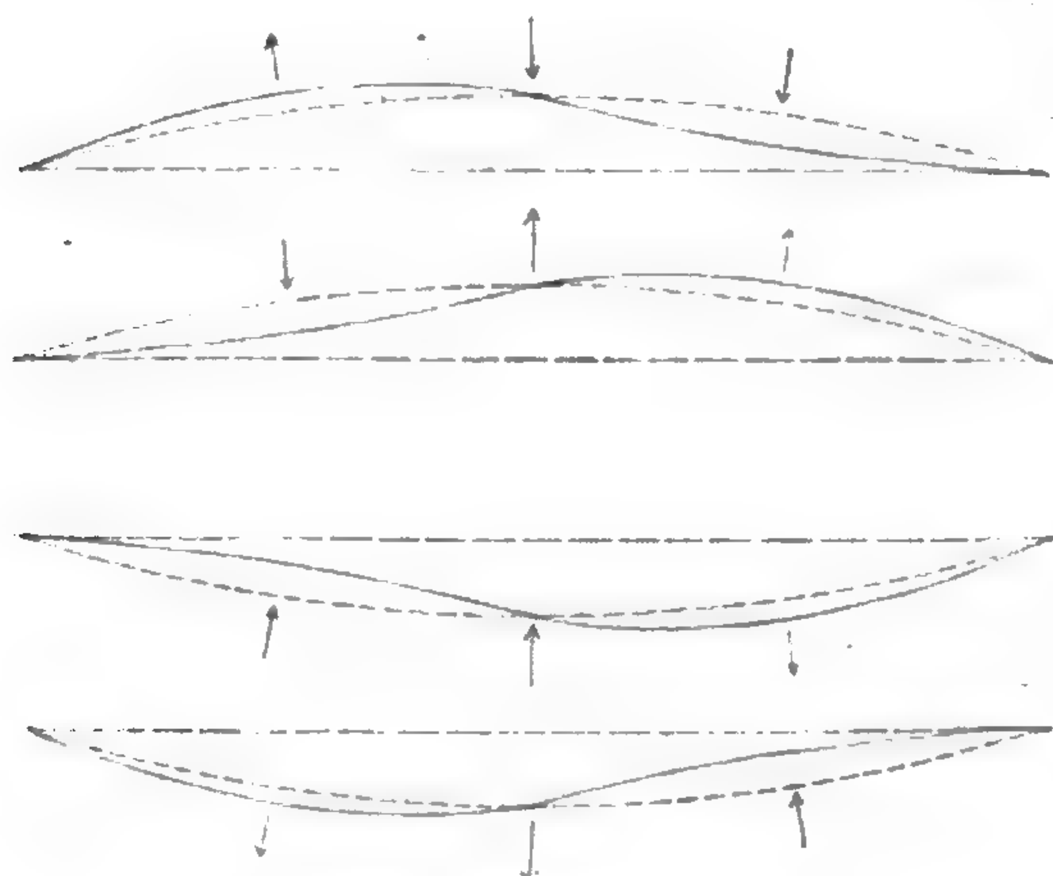


Fig. 588. — Sons harmoniques.

peut entendre les sons 4, 5, 6, etc. On donne à ces sons le nom de sons *harmoniques;* leur production est un phénomène constant dans tous les systèmes solides, et c'est à leur coexistence avec le son principal qu'est dû, comme nous le verrons plus loin, le timbre des sons en général.

On explique du reste la production des harmoniques dans

les cordes en admettant qu'en même temps que la corde vibre dans sa totalité, elle se divise spontanément en 2, 3, 4 parties égales qui vibrent simultanément et donnent précisément la série des harmoniques. La figure 588 montre les formes successives que prend une corde qui vibre de manière à donner à la fois le son fondamental et son octave, c'est-à-dire le premier harmonique.

Il peut se faire que la corde ne fasse entendre nettement que l'un des harmoniques et nullement le son principal. On peut

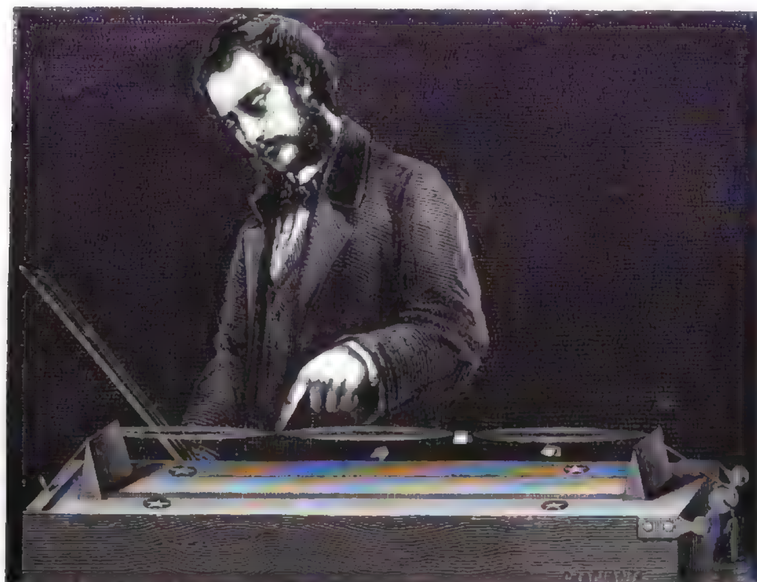


Fig. 589. — Production des harmoniques.

obtenir directement ce résultat en plaçant un chevalet à une partie aliquote de la corde, au tiers par exemple (fig. 589), et attaquant la petite longueur. On reconnaît que la grande longueur se divise spontanément en deux parties égales vibrant à l'unisson. Sauveur constatait le fait par un procédé très-ingénieux : il plaçait au-dessus de la corde de petits cavaliers en papier. Au moment de l'attaque, les petits cavaliers sont projetés, excepté aux points qui correspondent aux limites des subdivisions de la corde.

On peut faire l'expérience d'une façon plus instructive. On place

sur le sonomètre deux cordes que l'on met rigoureusement à l'unisson, on les couvre toutes deux de petits cavaliers et on attaque l'une d'elles seulement, comme il vient d'être expliqué; on voit alors la corde libre se diviser, elle aussi, en trois parties vibrantes; les cavaliers sont projetés partout, excepté sur les deux points qui correspondent aux subdivisions. C'est là un cas particulier d'un phénomène aussi important que général : il consiste en ce que la vibration d'un corps se communique à ceux qui peuvent vibrer à l'unisson avec lui. La propagation du son n'est, en réalité, qu'une grande vibration à l'unisson; mais indépendamment de l'onde de propagation, il y a des ondes de renforcement dues à des vibrations synchrones de parties limitées du milieu qui transmet le son; c'est le principe de tous les procédés employés pour renforcer les sons.

659. Vibrations longitudinales des cordes. — On peut aussi faire vibrer les cordes longitudinalement; il suffit de les frotter



Fig. 590. — Vibrations longitudinales des cordes.

dans le sens de leur longueur, soit avec l'archet, soit avec les doigts ou un morceau de drap imbibé de colophane. On entend dans ces circonstances un son très-aigu, comparativement à celui que produit la corde ébranlée transversalement. Dans le cas du son fondamental (fig. 590), une moitié AC se dilate ou se condense, pendant que la moitié CB se condense ou se dilate : au point C, la densité ne varie pas, mais l'amplitude du mouvement est la plus grande possible; c'est un ventre de vibration; les points A et B sont des nœuds.

Mais la corde peut se diviser aussi en parties vibrant séparément. Les figures 591 représentent l'état vibratoire correspondant à la division de la corde en trois parties égales.

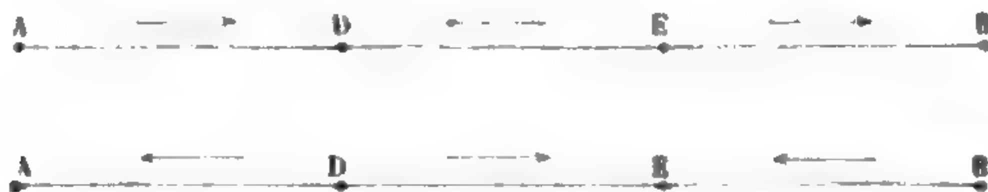


Fig. 591. — Vibrations longitudinales des cordes.

Quand il s'agit ou de la vibration de la corde dans sa

totalité ou d'un même mode de division, les vibrations longitudinales sont soumises, comme les vibrations transversales, à la loi des longueurs, c'est-à-dire que le nombre de vibrations varie en raison inverse de la longueur de la corde. Quant au nombre absolu, il est, toutes choses égales d'ailleurs, beaucoup plus considérable dans le cas des vibrations longitudinales que dans le cas des vibrations transversales. Suivant la théorie, si on désigne par n et n' les nombres de vibrations longitudinales et transversales exécutées par une même corde vibrant dans sa totalité, on a la relation $\frac{n}{n'} = \sqrt{\frac{l}{\alpha}}$; l désigne la longueur de la corde et α l'allongement qu'elle est susceptible d'éprouver sous l'action du poids qui la tend.

660. Instruments à cordes. — Les vibrations transversales des cordes sont seules utilisées dans la construction des instruments de musique. Dans le piano et la harpe, il y a une corde pour chacune des notes qui peuvent entrer dans une composition musicale, suivant le mode tempéré. On fait varier la longueur, la grosseur des cordes et quelquefois même leur nature, pour pouvoir obtenir ces diverses notes. L'une des extrémités s'enroule sur une cheville, que l'on peut tourner plus ou moins de manière à modifier la tension, quand on veut accorder l'instrument.

Dans le violon, la basse et la contrebasse, il y a quatre cordes tendues avec des chevilles au-dessus d'une caisse sonore. C'est en appuyant le doigt sur la corde que l'artiste détermine la longueur de la partie vibrante propre à la production de la note.

Dans ces instruments il est possible de donner aux sons toute la rectitude nécessaire, sans aucune altération analogue au tempérament des instruments à sons fixes.

661. Vibrations transversales des systèmes rigides. — Verges. — Plaques. — Cloches. — Nous n'insisterons pas sur les lois des vibrations des systèmes rigides; les différents sons produits dépendent de la disposition des points fixes qui déterminent eux-mêmes le mode de subdivision du système. On rend ces subdivisions sensibles à l'aide du procédé imaginé par Chladni. Il consiste à verser à la surface de la lame du sable fin; pendant la vibration, on le voit

s'agiter et finalement s'accumuler suivant certaines lignes qui sont évidemment la limite de parties (concamérations) vibrant en sens contraire. Ce sont les *lignes nodales ;* on doit les considérer comme les intersections de surfaces nodales intérieures avec la surface même du corps. Chladni et Savart ont obtenu un grand nombre de ces figures avec les plaques; leur étude n'a pas du reste un grand intérêt.

Les timbres, les cloches se divisent en segments passant tous par le sommet qui sert ordinairement à fixer ces sortes de corps. On distingue nettement ces parties vibrantes en plaçant dans le vase un liquide. Au moment où l'on attaque un des points du bord avec l'archet, on voit à la surface du liquide se former des stries, divisées d'ailleurs en un certain nombre de groupes. Le son s'élève avec le nombre de concamérations ainsi formées. On peut graduer les dimensions des vases de façon que les notes qu'ils produisent forment une gamme. On a quelquefois utilisé des instruments fondés sur ce principe.

662. Diapason. — La rigidité des verges les rend propres à conserver sans altération sensible le son qu'elles sont susceptibles de produire, à raison de leurs dimensions. C'est à cause de cette circonstance que les accordeurs se servent fréquemment d'un petit instrument appelé *diapason ;* il est essentiellement formé d'une verge d'acier recourbée fixée en son milieu et dont les extrémités se rapprochent légèrement l'une de l'autre. Si on donne un petit choc à l'instrument, il se produit un son suraigu qui s'éteint assez rapidement; c'est un harmonique supérieur et formant d'ailleurs avec le son principal une dissonnance marquée. Quant au son principal, qui est précisément celui que l'accordeur utilise, il persiste longtemps après l'autre, et on peut l'entendre distinctement en approchant le diapason de l'oreille.

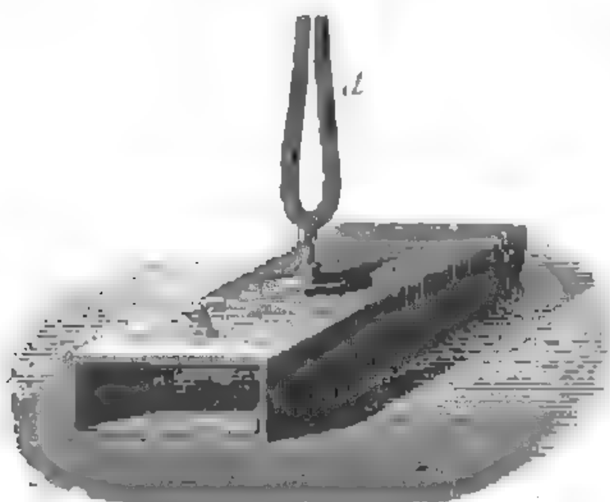


Fig. 592. — Diapason monté.

La figure représente un diapason monté sur une boîte de résonnance; celle-ci n'a pas seulement pour effet de renforcer le

son, elle empêche la production du son suraigu, par suite de son désaccord avec les harmoniques mêmes de la masse d'air.

Dans les diverses expériences d'acoustique, dans l'emploi du tonomètre de Scheibler par exemple, ces boîtes de résonnance permettent ainsi d'obtenir des sons simples et jouent par conséquent un rôle important.

663. Loi générale des vibrations d'un système solide. — Nous n'insisterons pas davantage sur les vibrations des corps rigides, et nous mentionnerons seulement une loi très-générale qui est d'ailleurs une conséquence rationnelle de la théorie générale de l'élasticité. Elle consiste en ce que, *lorsque deux solides semblables vibrent suivant le même mode, les nombres de vibrations sont inversement proportionnels aux dimensions homologues.*

La formule des vibrations transversales des cordes nous permet de vérifier la loi dans ce cas particulier.

Si en effet on prend le rapport N et N' des nombres de vibrations de deux cordes cylindriques, on a, d'après la formule citée :

$$\frac{N}{N'} = \frac{1}{rl}\sqrt{\frac{P}{\pi d}} : \frac{1}{r'l'}\sqrt{\frac{P'}{\pi d'}},$$

ou

$$\frac{N}{N'} = \frac{r'l'}{rl}\frac{\sqrt{Pd'}}{\sqrt{P'd}} = \frac{l'}{l}\frac{\sqrt{\frac{P}{r^2}d'}}{\sqrt{\frac{P'}{r'^2}d}}.$$

Or, si l'on suppose que les cordes soient de même nature et que la tension rapportée à l'unité de section soit la même, le second membre de l'égalité précédente se réduit à $\frac{l'}{l}$, ce qui est l'expression même de la proposition dont il s'agit.

664. Tuyaux sonores. — Dans les tuyaux sonores, c'est l'air lui-même qui éprouve le mouvement vibratoire auquel est dû le phénomène sonore. Pour ébranler la masse d'air contenue dans le tuyau, on se sert particulièrement de ce qu'on appelle l'*embouchure de flûte.* On sait que dans la flûte ordinaire le courant d'air sortant des lèvres vient frapper les bords taillés en biseau d'une ouverture. Ce choc produit un mouvement vibratoire qui se communique à

l'air de la flûte. Dans les tuyaux d'orgue, on imite cette disposition de la manière suivante : Un courant d'air fourni par une soufflerie arrive par la partie inférieure du tuyau cylindrique (fig. 593) ou prismatique (fig. 594) et s'échappe par une fente étroite appelée la

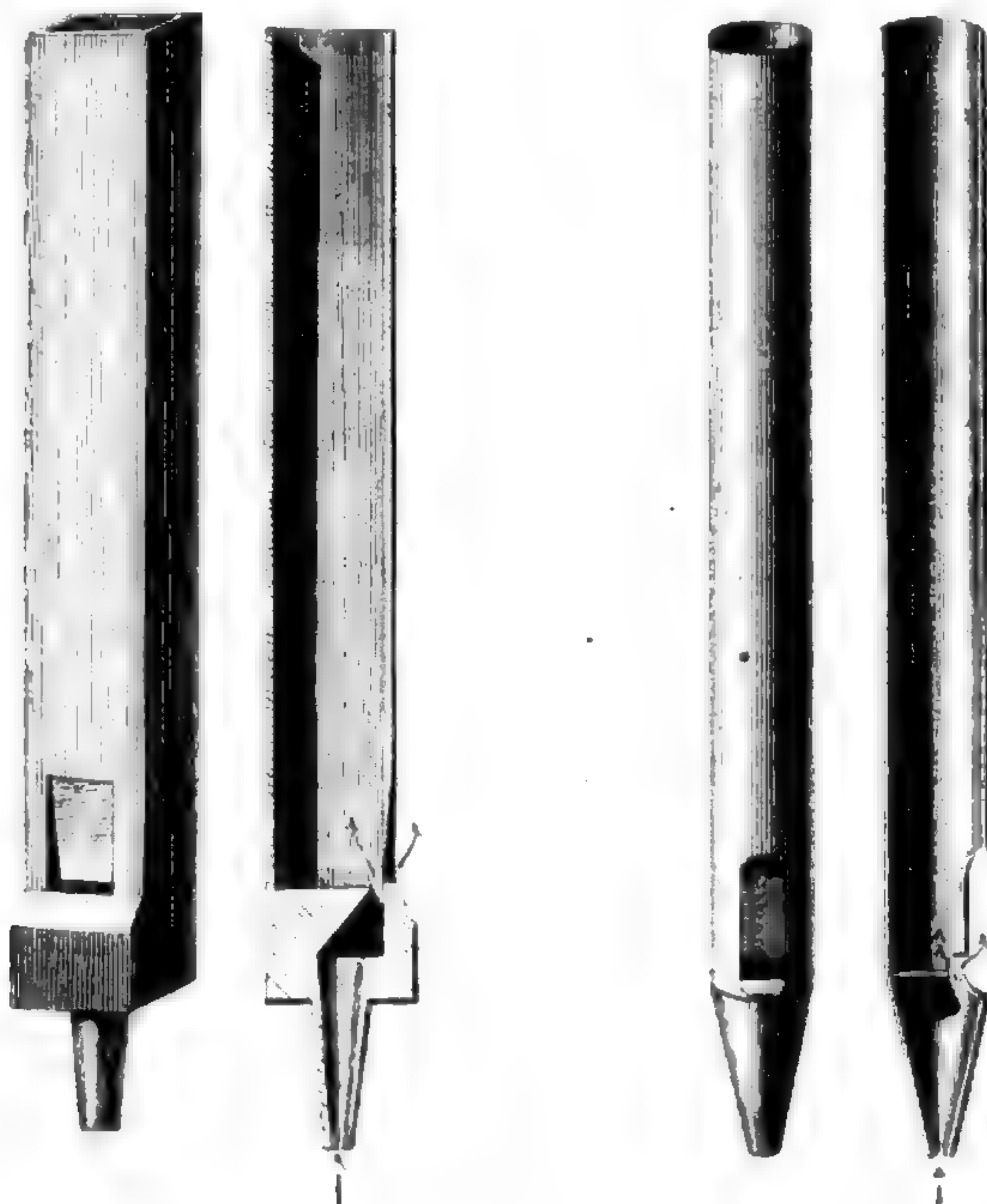


Fig. 593. Tuyaux sonores. Fig. 594.

lumière ; c'est la partie inférieure d'une ouverture dont l'ensemble est désigné sous le nom de *bouche*. La partie supérieure, amincie en biseau, porte le nom de lèvre supérieure et détermine la vibration de la masse d'air du tuyau. Cette disposition spéciale de l'embouchure est l'origine directe du son. On peut constater en effet que l'embouchure seule suffit à produire le son ; toutefois ce son est maigre et a un caractère marqué de discordance ; la masse d'air du tuyau vibrant à l'unisson le renforce et le rend plus homogène.

La soufflerie destinée à faire parler le tuyau est représentée dans la figure 595. Elle se compose d'un soufflet V, mis en mouvement par une pédale P. On peut accélérer la vitesse du courant soit en

chargeant le soufflet de poids, soit en appuyant sur la tige T[1]. L'air arrive par un gros tuyau latéral dans une sorte de réservoir prismatique C appelé sommier. Sur la face supérieure du sommier sont établies diverses ouvertures *a*, *b*, *d*, destinées à recevoir les tuyaux. Une plaquette K, pressée par un ressort R, forme la partie inférieure de ces ouvertures; mais en appuyant sur la touche *a*, on abaisse la plaquette et l'air arrive dans le tuyau. Un arrêt ménagé à la base de la touche permet de maintenir celle-ci abaissée, sans qu'on soit obligé d'appuyer le doigt dessus.

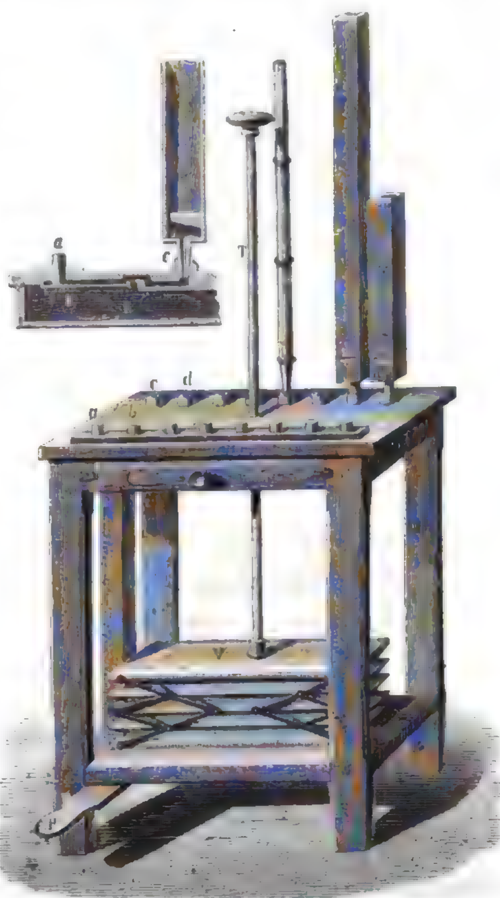


Fig. 595. — Soufflerie pour les tuyaux sonores.

665. Dans les tuyaux c'est l'air qui est le corps sonore. — On peut facilement constater que, dans les tuyaux, c'est effectivement l'air qui est le corps sonore, et que les parois n'ont qu'une influence insignifiante sur la nature du son. On dispose à cet effet sur la soufflerie trois tuyaux de même longueur, l'un en bois, le deuxième en cuivre et le troisième en carton épais; en les faisant parler successivement, on reconnaît que les trois sons ont exactement la même hauteur; tout au plus observe-t-on une

1. Dans les expériences de précision, on emploie des souffleries perfectionnées dans lesquelles l'air s'écoule sous une pression constante.

légère différence dans le timbre. Toutefois, si les parois du tuyau sont très-minces, leur vibration a une influence sensible, et la hauteur du son est modifiée.

666. Lois des dimensions homologues.— Nous retrouvons dans la vibration des masses gazeuses la loi générale énoncée au § 663. Ainsi plaçons sur la soufflerie deux tuyaux prismatiques semblables (fig. 596), et dont les dimensions homologues soient dans le rapport de 2 à 1, on reconnaîtra en les faisant parler que l'air du petit tuyau fait deux fois plus de vibrations que celui de l'autre; le son produit est, en effet, exactement à l'octave aiguë de celui du grand tuyau.

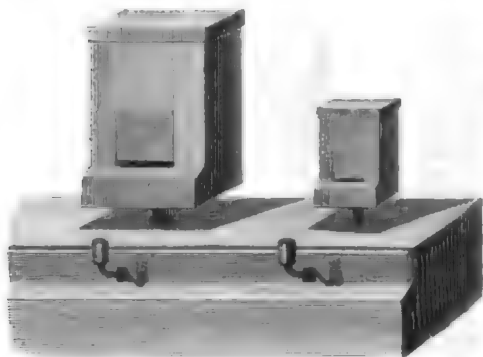


Fig. 596. — Lois des dimensions homologues.

667. Lois de Bernoulli. — La loi précédente s'applique à des tuyaux de forme quelconque et dont toutes les dimensions sont comparables entre elles. Lorsqu'il s'agit de tuyaux dont la longueur est beaucoup plus grande que les dimensions latérales, on observe des lois spéciales connues sous le nom de lois de Bernoulli, et qui sont le fondement principal de la théorie des instruments à vent. Nous allons les exposer succinctement.



Fig. 597. Production des harmoniques d'un tuyau.

I. *Lois des harmoniques d'un tuyau ouvert.* — On place sur la soufflerie un tuyau ouvert B (fig. 597), on abaisse la touche correspondante et on ouvre graduellement le robinet placé à la partie inférieure ; on commence par entendre un son grave peu intense, c'est le son fondamental du tuyau. A mesure qu'on ouvre le robinet et qu'on produit une vitesse plus grande de l'air en appuyant sur le soufflet, on entend une série de sons de

plus en plus aigus. Ce sont les harmoniques du tuyau ouvert. En désignant par 1 le nombre de vibrations du son fondamental, les nombres de vibrations des harmoniques successifs sont exprimés par les nombres 2, 3, 4, 5..., c'est-à-dire par la série des nombres naturels.

II. *Harmoniques des tuyaux fermés.* — Si on répète la même expérience avec un tuyau A fermé à son extrémité supérieure, on constate une série d'harmoniques représentés successivement par les nombres 1, 3, 5, 7..., c'est-à-dire par la série des nombres impairs.

668. Explication des lois de Bernoulli. — On explique les résultats précédents en assimilant les vibrations des colonnes d'air dans les tuyaux aux vibrations longitudinales des cordes ou des verges. Les harmoniques sont déterminés par la division spontanée de la colonne en un certain nombre de parties vibrant à l'unisson et séparées par des nœuds ou des ventres de vibration. Or la position des nœuds et des ventres se trouve ici déterminée nécessairement par la condition que le fond d'un tuyau bouché soit nécessairement un nœud, et que l'orifice et l'extrémité ouverte soient nécessairement des ventres.

En admettant cette condition, qui paraît d'ailleurs évidente, considérons d'abord un tuyau ouvert : le son le plus grave correspondra nécessairement au cas où un seul nœud sera placé au milieu du tuyau entre les deux ventres des deux extrémités. Appelons 1 le nombre de vibrations correspondant. Le mode de subdivision suivant sera celui où il y aura deux nœuds ; les longueurs des colonnes vibrantes seront réduites de moitié, le son sera donc représenté par 2 ; dans le cas de trois nœuds, on aura le son 3, et ainsi de suite. La série des sons sera donc représentée par la suite des nombres naturels 1, 2, 3 . . .

Dans le cas du tuyau fermé, le son fondamental correspondra au cas où il y aura un seul nœud placé au fond et un seul ventre à l'orifice ; soit 1 le son produit. Dans le son suivant, il y aura un nœud au tiers du tuyau et un ventre aux deux tiers ; les longueurs vibrantes étant trois fois plus courtes, le son produit sera 3. Dans le mode suivant, il y aura deux nœuds et par suite cinq parties

vibrantes distinctes, d'où le son 5, et ainsi de suite. La série des sons sera donc représentée par la suite des nombres impairs 1, 3, 5 . . .

Il résulte de cette théorie que le son fondamental de tuyaux de diverses longueurs doit correspondre à des nombres de vibrations inversement proportionnels aux longueurs. Cette conséquence est vérifiée par l'expérience.

On voit aussi que le son fondamental d'un tuyau fermé correspond à une partie vibrante deux fois plus longue que celle qui donne le son fondamental dans un tuyau ouvert de même longueur. On en conclut, et l'expérience le vérifie complétement, que le *son fondamental d'un tuyau fermé est à l'octave grave du son fondamental d'un tuyau ouvert de même longueur.*

669. Conséquences diverses. — On déduit encore de cette théorie que si on substitue dans un tuyau une cloison fixe à la couche d'air occupé par un nœud, on ne doit pas modifier la hauteur du son. On en conclut aussi que la hauteur du son ne sera pas modifiée si l'on met en communication avec l'atmosphère les points où se trouvent des ventres. On vérifie cette dernière conséquence de la manière suivante : on prend un tuyau formé de deux parties A', A'' (fig. 598) vissées l'une sur l'autre et embouchées de manière à donner le deuxième harmonique 2. Dans ce mode de subdivision il y a un ventre intermédiaire situé au point de jonction des tubes. Or, si, pendant que le tuyau parle, on dévisse le tube A', le son conserve la même hauteur.



Fig. 598.

670. Origine des nœuds et des ventres. — Les nœuds et les ventres ont pour origine l'interférence de l'onde directe produite à l'embouchure et d'une onde réfléchie formée à l'extrémité du tuyau. Dans le cas d'un tuyau fermé, le phénomène est identique à celui qui a été exposé (637) dans l'explication du mécanisme de la propagation du son. On en conclut immédiatement que les nœuds successifs sont distants d'une demi-longueur d'onde; il en est de même des ventres. Dans le cas du tuyau ouvert, il y a aussi une onde réfléchie, mais dans une condition physique différente. En effet, la couche d'air qui occupe exactement l'extré-

mité se détend dans l'air extérieur; ce mouvement de dilatation se transmet en arrière dans le tuyau sous la forme d'une onde réfléchie qui diffère de celle qui se produit dans un tuyau fermé, en ce que les deux vitesses à l'extrémité, au lieu d'être égales et contraires, sont égales et de même sens. Il en résulte qu'à l'extrémité du tuyau se trouve un ventre au lieu d'un nœud; mais le résultat relatif à la distribution des nœuds et des ventres est toujours le même, et l'intervalle qui les sépare les uns des autres est toujours égal à une demi-longueur d'onde.

671. Application à la mesure de la vitesse du son dans les différents gaz. — La demi-longueur d'onde est l'espace parcouru par le son pendant la durée d'une vibration du corps sonore (637). Si nous appelons cette durée t, λ la demi-longueur d'onde et v la vitesse du son, on a donc la relation $\lambda = vt$. Soit n le nombre de vibrations exécutées dans une seconde, la durée d'une vibration t sera $\frac{1}{n}$, et par suite la formule précédente devient

$$v = n\lambda,$$

formule très-simple, qu'on peut considérer comme le résumé de la théorie de Bernoulli, et qui lie la vitesse v à deux quantités n et λ faciles à déterminer.

La quantité n se mesure par les méthodes indiquées au chapitre LVI. Quant à λ, on peut le déterminer en faisant mouvoir un piston dans le tuyau de manière à lui faire occuper deux nœuds consécutifs. C'est là le principe des expériences avec lesquelles Dulong et plus récemment M. Wertheim ont déterminé la vitesse du son dans différents gaz, successivement employés à faire parler un même tuyau. Voici le tableau des résultats obtenus :

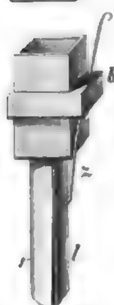
Air.	331	Acide carbonique. . . .	262
Oxygène	317	Protoxyde d'azote . . .	262
Hydrogène	1,269	Gaz oléfiant	314
Oxyde de carbone . . .	337		

Remarquons que le même principe est applicable à la mesure du son dans les liquides, il suffit de les faire vibrer comme des gaz dans un tuyau. Il est même applicable aux solides, car dans les

vibrations longitudinales des verges on doit considérer l'intervalle entre deux nœuds comme la demi-longueur de l'onde qui se propage dans le solide; on pourra donc appliquer la formule $v = n\lambda$ et mesurer ainsi la vitesse de propagation dans le solide. C'est par cette méthode qu'ont été déterminés les nombres cités au § 635.

672. Tuyaux à anche. — Les tuyaux embouchés comme il a été dit (664) sont appelés à embouchure de flûte; on se sert en outre, dans les orgues, des tuyaux à anche (fig. 599). L'anche est formée par une lame élastique *l* fermant une sorte de rigole *r*. L'air arrive de la soufflerie dans le tuyau porte-vent *t*, ébranle la lame élastique, la met en vibration et s'échappe par le tuyau *t'*. La tige *z*, appelée rasette, mobile à frottement dur dans le trou *b*, limite la partie vibrante de l'anche. Les tuyaux à anche sont souvent terminés à leur partie supérieure par une sorte de cornet arrondi.





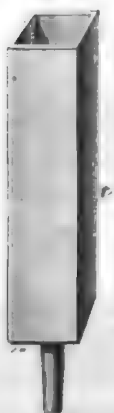
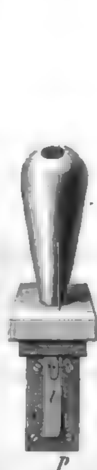


Fig. 599. Tuyau à anche.





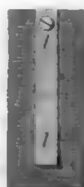


Fig. 600. — Anche libre.

La fig. 599 représente un tuyau à *anche battante*; l'anche bat en effet contre les bords de la rigole, ce qui donne au son un caractère nasillard. Dans le tuyau à *anche libre* (fig. 600) la languette entre dans l'intérieur de la rigole *p* dont elle ne touche pas les bords, ce qui donne lieu à un son beaucoup plus doux.

Les sons des tuyaux à anche peuvent, quand on force le vent, augmenter d'intensité dans une assez large mesure sans changer de

hauteur. Cette circonstance permet d'obtenir une *expression* que ne peuvent donner les tuyaux à embouchure de flûte, qui, dans la même circonstance, *octavient*, c'est-à-dire produisent les harmoniques supérieurs.

673. Instruments à vent. — Les instruments à vent sont ou à embouchure de flûte ou à anche. La première catégorie renferme la flûte traversière proprement dite et le flageolet. La clarinette, le hautbois, le basson, ont une anche formée par une lame de roseau fixée sur le bec de l'instrument. Dans le cor, la trompette, le clairon la fonction de l'anche est remplie par les lèvres. Les diverses notes constitutives d'un chant sont obtenues dans ces divers instruments par des moyens différents. Dans les tuyaux simples comme le cor, la trompette, on reste dans les harmoniques supérieurs qui se trouvent assez rapprochés pour former une gamme. Les trous de la flûte, de la clarinette, font naître, quand on les ouvre, des ventres correspondants et donnent naissance par suite à un harmonique déterminé. Dans le trombone, le cornet à piston, on peut faire varier la longueur de la colonne d'air vibrante.

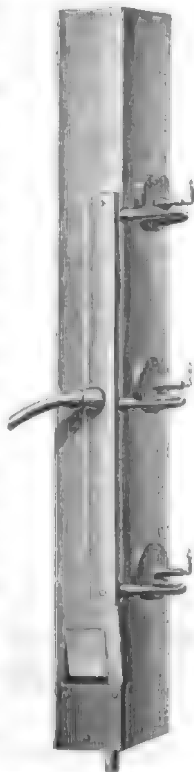


Fig. 601. — Flammes manométriques.

674. Flammes manométriques. — M. Kœnig applique depuis plusieurs années à l'étude de la constitution de l'air d'un tuyau sonore une disposition ingénieuse représentée par la fig. 601. Trois petits becs de gaz sont placés le long d'un tuyau, les deux extrêmes en face de nœuds, par exemple, et celui du milieu en face d'un ventre. Le gaz qui alimente ces becs n'est séparé de l'air du tuyau que par une légère membrane verticale. Si l'on fait parler le tuyau, la flamme du nœud est vivement agitée par suite des condensations et des dilatations de la masse gazeuse, tandis qu'elle est à peu près immobile dans le voisinage du ventre.

L'agitation de la flamme est une véritable vibration ; aussi, si l'on vient à l'observer dans un miroir tournant, elle offre l'as-

pect d'une série de languettes séparées par des intervalles noirs dont la distribution dépend de la nature des vibrations.

Il est facile de se rendre compte de cette apparence. En effet, pendant la vibration de la flamme, celle-ci éprouve des variations successives de longueur : à chacune de ces longueurs correspond une image qui n'a pas la même situation, puisque le miroir a un mouvement de rotation continu. On apercevra donc une base commune formée par la région au-dessous de laquelle la flamme ne descend jamais, et une série de languettes distinctes. Si l'on place à côté l'un de l'autre deux tuyaux donnant deux sons à l'octave l'un de l'autre, on voit distinctement à côté de l'image du son grave la seconde image formée d'un nombre de languettes doubles, les unes coïncidant à peu près avec celles de la première, les autres situées dans l'intervalle qui les sépare.

CHAPITRE LVI.

ÉTUDE OPTIQUE DES SONS. — TIMBRE.

675. Étude optique du son. — Le son est une sensation spécifique perçue par l'organe de l'ouïe, mais il peut se manifester à d'autres sens; ainsi la main sent le frémissement d'un corps sonore, l'œil voit le sable s'agiter sur une plaque vibrante, un style tracer sa vibration sur le vibroscope, etc. Cette sorte d'aide que peuvent se prêter les différents sens pour l'appréciation d'un phénomène qui paraît ne ressortir que de l'un d'eux est très-digne d'intérêt. M. Lissajous a fait de l'investigation optique du son une application fort curieuse que nous allons exposer sommairement.

676. Expérience de M. Lissajous. — Supposons qu'on introduise dans une chambre obscure (fig. 602) un faisceau de lumière solaire qui, concentré par une lentille L, soit réfléchi d'abord par un petit miroir placé sur l'une des branches d'un diapason D, puis par un second miroir M, et enfin vienne tomber sur l'écran E; il se formera sur cet écran une image du soleil qu'on pourra rendre très-nette et très-brillante en plaçant convenablement la lentille. Si les deux miroirs sont immobiles, l'image sera immobile elle-même; mais si l'on vient à faire vibrer le diapason en l'attaquant de manière à écarter les branches dans leur propre plan, l'image réfléchie oscillera suivant une direction verticale II', et, à cause de la persistance des impressions lumineuses, l'œil verra une ligne lumineuse II'. Si, le diapason étant au repos, on faisait tourner le miroir M autour d'un axe vertical, l'image éprouverait un déplacement dans le sens horizontal. Si par conséquent on produit ces deux mouvements à la fois, si, par

exemple, on fait vibrer le diapason pendant que le miroir tourne, on observera sur l'écran une ligne sinueuse dont chaque sinuosité correspond à une vibration du diapason.

Supposons actuellement qu'on remplace le miroir M par un second diapason dont le plan soit perpendiculaire à celui du

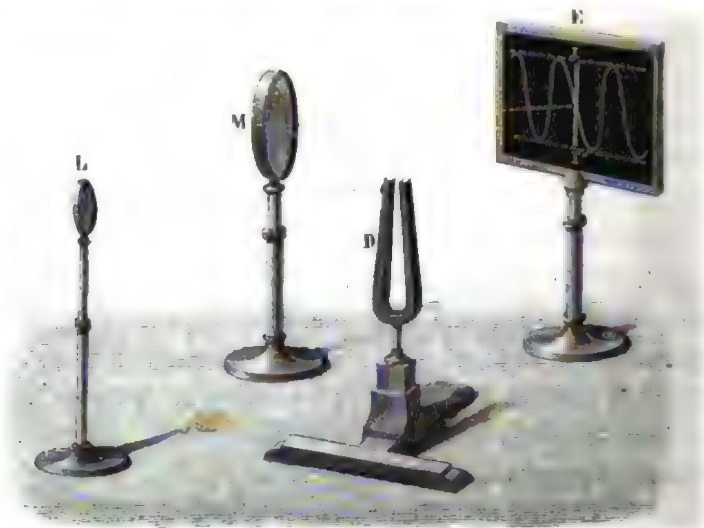


Fig. 602. — Principe de l'expérience de M. Lissajous.

premier; si on fait vibrer ce dernier tout seul, l'image éprouvera un déplacement horizontal semblable à celui que produisait la rotation du miroir, à cela près que ce déplacement aura un caractère oscillatoire, et par conséquent l'œil apercevra sur l'écran une ligne lumineuse horizontale dont la longueur décroîtra graduellement avec l'amplitude de la vibration. Si l'on fait vibrer les deux diapasons à la fois, la petite image du soleil pourra être considérée comme animée de deux mouvements, l'un dans le sens vertical, l'autre dans le sens horizontal, et, par suite, elle aura un certain mouvement résultant, qui se manifestera par une courbe dont la forme dépend du rapport des deux sons, c'est-à-dire des vitesses relatives des petits miroirs.

Au lieu de procéder par projection, on peut observer le phénomène directement par le moyen d'une lunette; c'est la disposition indiquée par la figure 603.

Supposons les deux diapasons à l'unisson, les deux mouvements vibratoires composants ont alors la même période, et le calcul indique dans ce cas que la courbe est en général une ellipse. Cette ellipse peut d'ailleurs devenir un cercle quand les amplitudes des mouvements vibratoires sont égales, ou même une ligne

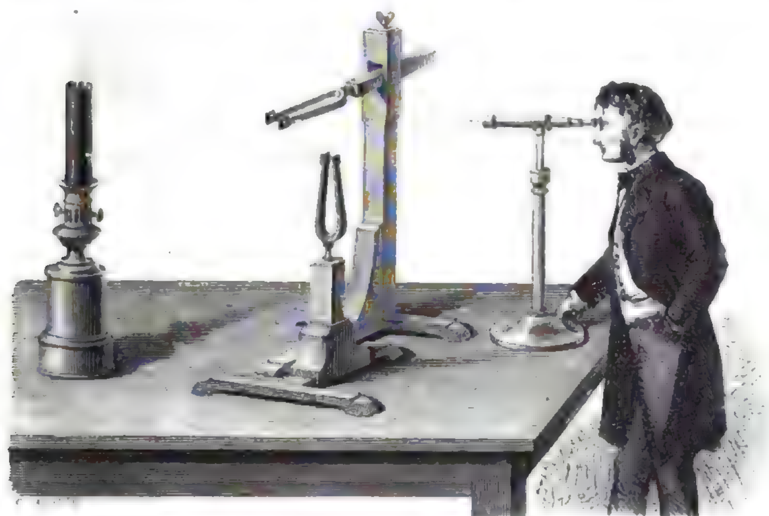


Fig. 603. — Expérience de M. Lissajous.

droite, quand la phase des deux mouvements vibratoires est la même ou diffère d'une longueur d'onde. On voit donc que, les deux diapasons étant à l'unisson, on devra apercevoir une figure ou elliptique, ou circulaire, ou rectiligne. Du reste, si l'unisson était rigoureux, c'est la même figure qui persisterait, éprouvant seulement une diminution de dimensions correspondante à la diminution d'amplitude du mouvement vibratoire. Mais cet unisson rigoureux n'est jamais obtenu, il y a toujours une petite différence, bien qu'elle puisse être assez petite pour échapper à l'oreille même la plus exercée. Cette différence se manifeste optiquement par deux caractères : premièrement le tracé de la courbe est légèrement altéré, mais si l'unisson est approché, cette altération ne modifie pas sensiblement la physionomie de la ligne lumineuse qui présente toujours l'une des formes caractéristiques de l'unisson. En second lieu, et c'est là le caractère le plus important, la petite différence

de hauteur amène une différence de phase graduellement croissante, de telle sorte qu'au lieu d'avoir une seule figure, on a une suite de figures passant les unes aux autres et se reproduisant périodiquement dans le même ordre. C'est une sorte d'oscillation de

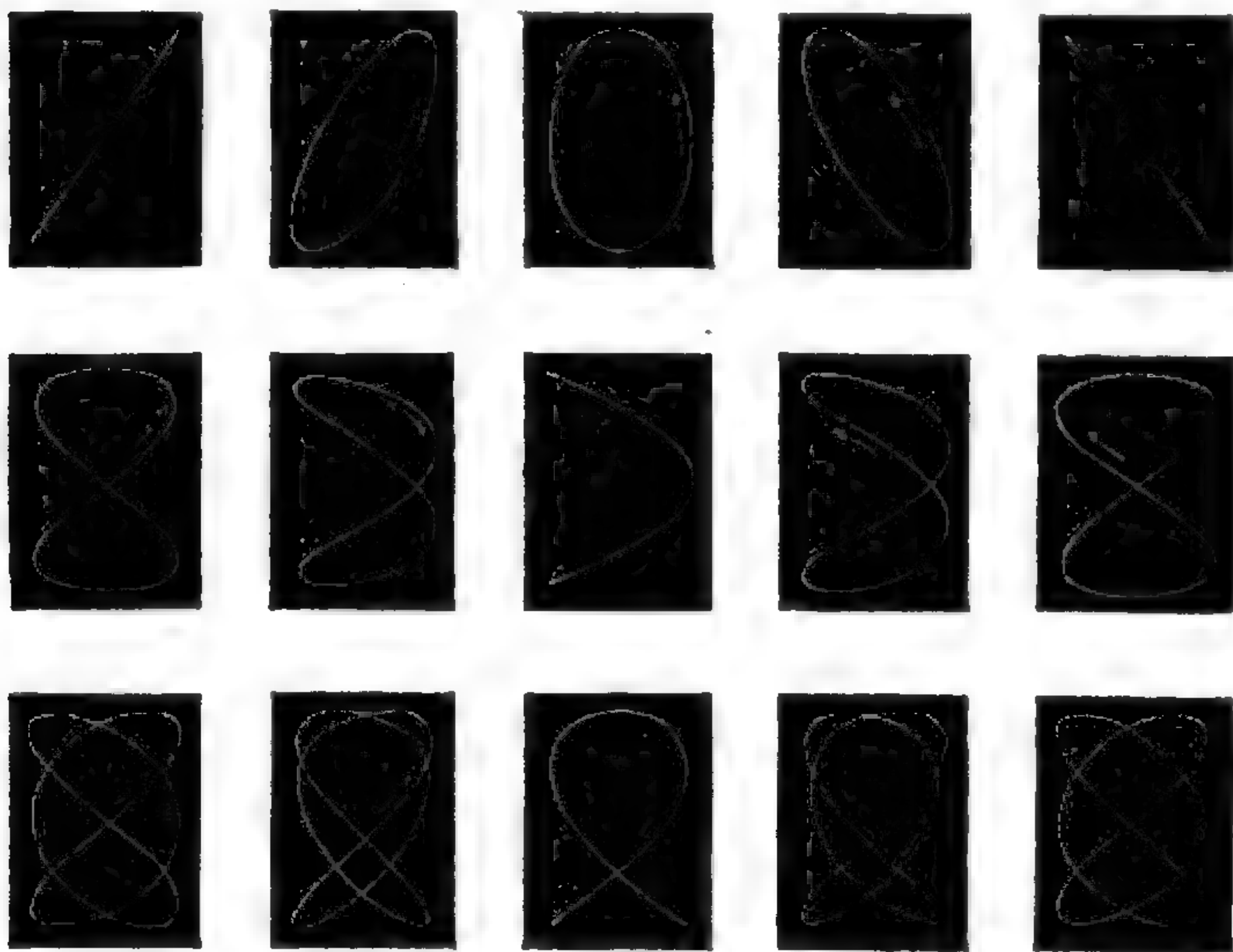


Fig. 604. — Figures de l'unisson, de l'octave et de la quinte.

la figure acoustique dont la durée sera d'autant plus grande que l'unisson sera plus près d'être rigoureux. Dans la figure 604 on a représenté sur la première ligne les figures acoustiques de l'unisson, sur la seconde celles de l'octave, et sur la troisième celles de la quinte.

677. Comparateur optique. — Cette circonstance permet de comparer les divers diapasons à un même diapason normal avec une précision infiniment supérieure à celle dont serait susceptible l'oreille la plus délicate. C'est là l'intérêt le plus vif des méthodes de M. Lissajous, en ce qu'elles permettent à l'un des sens de suppléer à un autre, quand ce dernier devient insuffisant. L'appareil dont se sert M. Lissajous se compose d'un diapason normal *f* (fig. 605) dont l'une des branches est munie d'une lentille objective. Au dessus est disposé un oculaire *g* formant avec l'objectif un véritable microscope. Le diapason à comparer D, disposé dans un plan perpendiculaire, présente sur l'une des branches un point

délié *m* tracé au diamant qu'on observe à l'aide du microscope. Si l'on fait vibrer les deux diapasons, ce trait donnera lieu à une figure



Fig. 605. — Comparateur optique des sons.

acoustique, dont les oscillations permettront de se rendre compte du plus ou moins grand degré de rigueur de l'ajustement.

678. Timbre des sons.— Le timbre est cette qualité indépendante de la hauteur et de l'intensité qui fait que les sons se distinguent les uns des autres. Le *la* du violon ne ressemble pas du tout au *la* de la flûte. La même note a un caractère différent, suivant qu'on la chante sur une voyelle ou sur une autre. Pendant longtemps on n'a eu sur ce sujet que des notions vagues et incomplètes. Les recherches de M. Helmoltz ont abouti à une théorie satisfaisante dont nous allons donner une idée succincte.

Remarquons d'abord que la hauteur et l'intensité d'un son dépendent du nombre de vibrations et de leur amplitude; il faut donc chercher l'origine du timbre dans un autre élément du mouvement vibratoire. Or il n'en est pas d'autre que la nature de la trajectoire

de la molécule vibrante. Cette trajectoire, tout en ayant des ondulations en même nombre, peut présenter dans son parcours des complications plus ou moins grandes, qu'on peut rendre sensibles par l'inscription graphique. On reconnaît en effet que, dans le plus grand nombre des cas, le tracé, outre les sinuosités générales, présente diverses sinuosités particulières qui doivent évidemment avoir un rapport déterminé avec la nature du son.

Ces sinuosités tiennent à l'existence de sons qui se produisent simultanément avec le son principal. Nous avons vu, en effet, que dans tous les systèmes vibrants il y a un très-grand nombre de sons possibles; on les désigne sous le nom d'harmoniques. Ces sons peuvent coexister avec le son fondamental, comme ils peuvent aussi se faire entendre séparément. Dans le premier cas, l'oreille peut les séparer en faisant pour les écouter un effort spécial; mais ils peuvent aussi former une sorte d'accompagnement indivis qui est précisément la cause du timbre. L'expérience suivante de M. Kœnig explique très-nettement cette double sensation. Sur une table de résonnance on groupe un gros diapason donnant un son très-grave et une série de petits diapasons donnant les divers harmoniques. Si l'on ébranle tout le système, il se produit un son grave, harmonieux et qui paraît unique, si l'on ne fait pas un effort tout spécial. Mais vient-on à arrêter le mouvement du gros diapason, immédiatement on distingue nettement les harmoniques qui l'accompagnaient tout à l'heure. Il y a donc une série d'harmoniques susceptibles de se fondre avec le son principal, et dont la coexistence ordinaire avec lui en détermine le timbre.

Tous les corps sonores produisent spontanément des harmoniques; il n'y a guère que les tuyaux d'orgue de grandes dimensions qui fournissent des sons simples, et l'expérience a montré qu'il y a précisément utilité dans ce cas à suppléer artificiellement à l'absence d'harmoniques. Ce qu'on appelle *fourniture* dans l'orgue est un ensemble de trois à sept tuyaux accordés à la quinte ou à l'octave les uns des autres; il en résulte un accompagnement de sons aigus qui se confond avec le son principal et lui donne un caractère, un timbre particulier. On est donc conduit à penser, ainsi que Rameau l'avait pressenti, il y a plus d'un siècle, que le timbre

d'un son est dû à la présence de certains harmoniques qui naissent en même temps que lui. Un son serait donc en général le résultat de la superposition de plusieurs sons, de même que les couleurs des objets naturels résultent de la superposition de plusieurs couleurs simples. Il faut ajouter que les diverses particularités accessoires à la production du son, le bruit de l'émission de l'air dans les instruments à vent, le grincement des crins de l'archet, etc., ajoutent leur influence à la cause propre du timbre.

679. Résonnateurs de Helmoltz. — M. Helmoltz a confirmé sa théorie par des expériences relatives à l'analyse des sons composés. Il s'appuie sur le fait de la communication du mouvement vibratoire et l'aptitude de certaines masses limitées de gaz à vibrer à l'unisson de certains sons. L'instrument dont il se sert porte le nom de *résonnateur;* il est formé d'un globe creux (fig. 606) en cuivre muni de deux ouvertures. L'une d'elles forme une sorte de pavillon, l'autre est munie d'une pointe qu'on introduit dans l'oreille. Les dimensions des résonnateurs sont choisies de façon à vibrer à l'unisson de sons déterminés; ils sont donc capables de renforcer, à l'exclusion des autres, les sons pour lesquels ils ont été accordés.



Fig. 606. — Résonnateur d'Helmoltz.

D'après cela, si l'on veut analyser un son complexe, on le soutient pendant quelque temps, et on introduit successivement dans l'oreille différents résonnateurs; lorsqu'on saisit un renforcement prononcé, c'est que le son du résonnateur est un des éléments du son que l'on étudie.

L'expérience peut être disposée de manière qu'un grand nombre de personnes puissent simultanément en apprécier l'effet. Une série de résonnateurs (fig. 607) accordés pour la série des harmoniques 1, 2, 3, 4, 5, 6 sont placés en ligne verticale en regard d'un miroir tournant. Chacun d'eux communique par la petite ouverture avec une capsule manométrique, munie de son bec de gaz. Il est alors très-facile de distinguer, quand on tourne le miroir.

celles des flammes qui sont influencées par le son que l'on étudie. Le corps sonore dont on se sert est promené pendant la rotation du miroir devant les pavillons du résonnateur.

C'est à la présence de tels et tels harmoniques que les sons

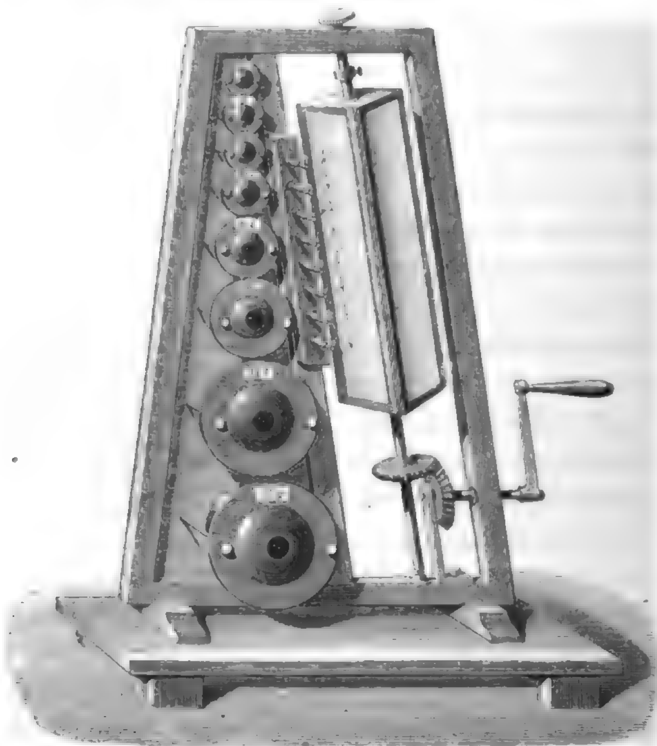


Fig. 607. — Analyse du timbre des sons.

doivent leur timbre, et par suite une partie de l'impression qu'ils peuvent produire. Ainsi, par exemple, les cloches, les cymbales fournissent toujours des sons accompagnés d'harmoniques suraigus et discordants; aussi n'est-ce que rarement que les carillons produisent un effet agréable.

La voix humaine est très-riche en harmoniques; il s'en produit un grand nombre dans la glotte, mais il n'y a que ceux qui peuvent déterminer la vibration de la masse d'air de la bouche qui soient renforcés. C'est là l'origine des voyelles. Celles-ci, d'après la théorie de M. Helmoltz, ne sont que le timbre particulier que prend

une note par suite de la résonnance de l'air de la bouche, résonnance dont l'effet est de renforcer parmi les harmoniques celui qui se rapproche le plus d'une certaine note fixe et caractéristique. Ainsi, par exemple, la voyelle A résulte de la résonnance $si\flat_4$. Ces notes caractéristiques peuvent être découvertes en plaçant devant la bouche ouverte une série de diapasons émettant une voyelle, et observant ceux dont le son se trouve renforcé.

680. Synthèse des sons. — M. Helmoltz a vérifié sa théorie par la synthèse des sons. Il emploie une série de diapasons dont la vibration est entretenue par l'aimantation et la désaimantation d'électro-aimants animés eux-mêmes par un diapason interrupteur de 128 vibrations par seconde. Les divers diapasons sont accordés aux harmoniques du son de 128 vibrations par seconde. Au-devant de chaque instrument est un tuyau renforçant, fermé par un disque susceptible d'être déplacé à l'aide d'une touche analogue à celle d'un piano. On peut ainsi, en abaissant telle ou telle touche, faire varier les harmoniques renforçants et produire assez distinctement le timbre propre à chaque voyelle.

OPTIQUE

CHAPITRE LVII.

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

681. De la lumière. — Lorsque l'on vient à fermer toutes les ouvertures d'une chambre, les objets qui se trouvent dans l'intérieur de la chambre cessent d'être aperçus. Ces objets existent toutefois, l'organe de la vision existe également, et pourtant le rapport ne s'établit point entre eux ; la vision n'a pas lieu. Il ne suffit donc pas qu'un objet soit en présence de l'œil pour que celui-ci l'aperçoive, il faut encore un agent intermédiaire à l'aide duquel s'établit le rapport de l'un à l'autre ; de même qu'il ne suffit point que l'oreille soit en présence d'un corps en vibration pour percevoir un son : ce son ne peut être perçu qu'autant qu'il existe un milieu pondérable et élastique capable de transmettre le mouvement à l'organe de l'ouïe. Dans le cas de la vision, cet intermédiaire s'appelle la *lumière*. Les physiciens admettent communément aujourd'hui qu'elle est constituée par un fluide infiniment subtil et élastique appelé *èther*, qui remplit tout l'espace et pénètre la substance même des corps transparents. Les corps que l'on appelle lumineux par eux-mêmes, les sources de lumière, sont dans un état particulier de vibration ; cette vibration se communique à l'éther, dans lequel elle se transmet de proche en proche par ondes analogues aux ondes sonores. Ce mouvement finit par atteindre la rétine.

qui se trouve impressionnée de la même façon que le sont les parties internes de l'oreille par les ondes sonores.

La lumière est donc une vibration comme le son. De même que tous les corps, à peu près, peuvent devenir sonores, de même tous les corps peuvent devenir lumineux; il suffit d'élever suffisamment leur température, soit directement par l'action d'un foyer calorifique, soit par l'intervention de l'électricité, soit, ce qui a lieu le plus ordinairement, par la production d'un phénomène chimique. Tout le monde sait que c'est à la combustion, qui n'est qu'une combinaison chimique, que nous empruntons toutes les sources de lumière dont nous nous servons dans l'économie domestique, l'industrie ou les arts.

Ce ne sont pas seulement des impressions optiques que produisent les vibrations de l'éther, ce sont aussi des impressions calorifiques (326). Toutefois la lumière ne commence que lorsque la vibration est devenue suffisamment rapide, de même que cela arrive pour l'oreille vis-à-vis des mouvements vibratoires ordinaires. Lorsqu'elles ont une vitesse moyenne, les vibrations de l'éther produisent une impression exclusivement calorifique. Le mouvement vibratoire de l'éther engendre aussi des phénomènes chimiques qui sont le fondement de la photographie. Ce sont surtout les vibrations rapides qui sont aptes à cette fonction spéciale. Il arrive même un moment où, à cause de leur rapidité, ces vibrations cessent d'impressionner la rétine, alors même qu'elles agissent pour exciter l'action chimique.

682 Propagation rectiligne de la lumière. — Le mouvement vibratoire de l'éther diffère beaucoup de celui qui transmet le son; la vitesse de transmission est infiniment plus grande, et les ondes infiniment plus courtes. Ainsi les sons les plus graves employés en musique ont une longueur d'onde d'une dizaine de mètres; l'onde des plus aigus est de 5 ou 6 centimètres, et les sons qui, sans aucun emploi musical possible, à cause de leur caractère suraigu, sont cependant susceptibles d'être perçus par l'oreille, ont encore une longueur d'onde d'environ un centimètre. Le phénomène optique qui correspond à la hauteur du son est la couleur. La couleur la plus *grave* est le rouge. Sa longueur d'onde est de

310 millionièmes de millimètre, ce qui correspond à 514 *trillions* de vibrations par seconde. Le *violet* est la couleur la plus *aiguë*, elle résulte de 752 trillions de vibrations par seconde, avec une longueur d'onde de 212 millionièmes de millimètre.

A cette particularité se rattache un phénomène très-important : c'est que les ondes arrêtées par un obstacle ne se reforment pas derrière, comme cela a lieu pour le son. Il y a bien, même dans le cas du son, une sorte d'*ombre sonore*, mais le fait est peu sensible, tandis qu'il est presque absolu pour la lumière, et les choses se passent de telle façon que la propagation de la lumière doit être considérée comme se faisant exactement suivant une ligne droite.

On peut démontrer la propagation rectiligne de la lumière par l'expérience suivante :

On place une lumière C (fig. 608) derrière un écran percé d'une petite ouverture A. A une certaine distance on dispose un second écran percé aussi d'une petite ouverture B, et on applique l'œil derrière. Tant que les trois points C, A, B sont en ligne droite, l'œil aperçoit la lumière ; mais pour peu que cette direction rectiligne soit altérée, on cesse de l'apercevoir. On peut donc admettre que, dans un même milieu du moins, la propagation de la lumière a lieu en ligne droite, et on nomme rayon lumineux toute ligne droite suivant laquelle la lumière se propage. Au lieu d'un écran, on pourrait en prendre plusieurs, et on démontrerait le fait de la façon la plus précise.

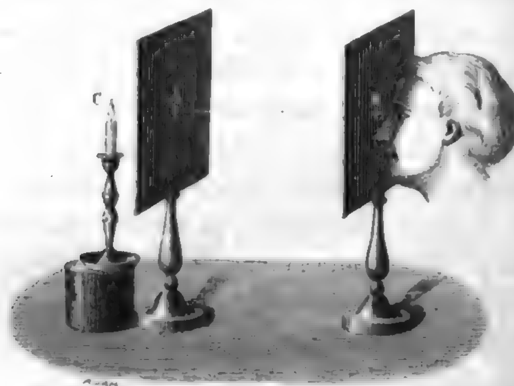


Fig. 608. — Propagation rectiligne de la lumière.

En présence d'une source de lumière, tous les corps deviennent lumineux, c'est-à-dire qu'ils éprouvent par communication le mouvement vibratoire caractéristique de l'impression lumineuse ; ils doivent donc être considérés, au même titre que les sources.

comme les centres d'où partent les rayons lumineux dirigés dans toutes les directions de l'espace.

Nous remarquerons toutefois que le fait de la propagation rectiligne n'a pas une rigueur absolue : divers phénomènes, en particulier ceux de diffraction, démontrent que les ondes se reforment réellement derrière les obstacles; mais il faut, pour les observer, des conditions spéciales qui ne se rencontrent pas dans les circonstances ordinaires. Nous n'en tiendrons nullement compte ici, et nous supposerons que les rayons lumineux sont formés exactement par des lignes droites. Divers phénomènes très-simples et très-connus peuvent se rattacher directement à cette supposition.

683. Chambre noire.— Si l'on vient à pratiquer une petite ouverture dans le volet d'une chambre (fig. 609), parfaitement close d'ailleurs, et qu'en face de l'ouverture on dispose un écran blanc, on aperçoit sur l'écran une image renversée du paysage extérieur. Cette image est d'autant plus nette que l'ouverture est plus petite, et que les objets sont plus éloignés; toutes les couleurs et leurs diverses nuances seront d'ailleurs reproduites avec la plus parfaite fidélité.



Fig. 609. — Chambre noire.

Ces résultats s'expliquent très-aisément. Considérons en effet un objet extérieur AB (fig. 610), et soit O la petite ouverture de la chambre. Le point A envoie des rayons lumineux suivant toutes les directions dans l'espace; parmi eux un petit faisceau pénètre dans la chambre par l'ouverture O et vient tomber sur l'écran en A'. Le point A' reçoit de la lumière du point A et n'en reçoit que de ce point. Il n'y a d'ailleurs aucun autre point de l'écran qui reçoive de la lumière du point A; l'œil sera donc impressionné par le point A' comme il le serait par le point A; en d'autres termes, le point A' sera l'image du point A. Par la même raison le point B' sera l'image du point B. Les points intermédiaires entre A et B feront leur image entre A' et B'; on aura donc en A' B' une image renversée de l'objet AB. On voit du reste que si l'ouverture est tant soit peu considérable, A' ne sera plus un point, mais une petite surface, intersection par l'écran du cône qui, ayant pour sommet le point A, aurait pour base l'ouverture elle-même. Il en serait de même pour tous les autres points; il n'y aurait donc pas unité de sensation dans les différents points de l'image, qui par cela même serait un peu confuse.

Fig. 610. — Théorie de la chambre noire.

On peut faire l'expérience de la chambre noire sous une forme différente. On perce avec une aiguille une petite ouverture dans une carte (fig. 611) qu'on interpose entre une bougie et un écran: on voit alors sur l'écran l'image renversée de la bougie. Si l'on opère dans une chambre obscure et que le trou soit très-fin, l'image obtenue est extrêmement nette.

C'est pour la même cause qu'un faisceau de lumière solaire qu'on laisse pénétrer (fig. 612) dans une chambre noire par un petit trou, forme un cône, rendu visible par les corpuscules qui sont toujours flottants dans l'air et qui sont éclairés par la lumière solaire elle-même. Suivant l'inclinaison du plan sur lequel tombe le cône, il se forme une image tantôt ronde, tantôt elliptique du soleil.

Lorsque les rayons du soleil tombent sur un arbre couvert de feuilles, les faisceaux qui passent à travers les divers interstices don-

nent lieu, quelle que soit la forme naturellement très-irrégulière de



Fig. 611.

ces derniers, à des images rondes ou ovales (fig. 613) que l'on voit

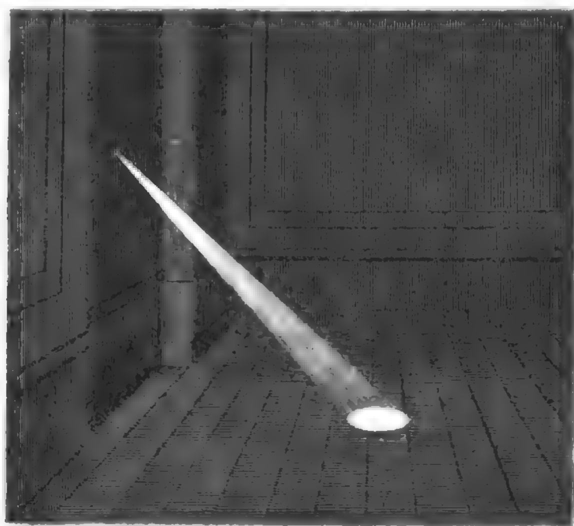


Fig. 612.

sur le sol dans l'ombre même de l'arbre. Au moment d'une éclipse de soleil, le disque solaire présente la forme d'un croissant plus ou

moins délié par suite de l'interposition de la lune. Si dans ces circonstances on observe les images du soleil dans l'ombre des arbres, on reconnaît que toutes ces images ont précisément la forme de



Fig. 613. — Images du soleil dans l'ombre des arbres.

croissant. Il en serait de même de l'image qu'on obtiendrait en faisant pénétrer un faisceau de lumière par un petit trou dans une chambre obscure.

684. Théorie des ombres. — La propagation rectiligne de la lumière sert de fondement à la théorie physique des ombres. Supposons, par exemple, un corps lumineux que nous réduirons par le raisonnement à un point unique, et plaçons au-devant de lui un corps opaque. Si l'on imagine par le point lumineux un cône dont la nappe soit tangente à la surface du corps opaque, il est évident que dans tout l'intérieur de ce cône, au delà du corps opaque, aucun rayon lumineux ne pourra pénétrer ; toute cette portion de

l'espace sera donc dans l'obscurité, s'il n'y a pas d'autre lumière que celle du point lumineux ; elle sera, dans tous les cas, dans une obscurité relative. C'est le cône d'ombre. L'intersectien du cône

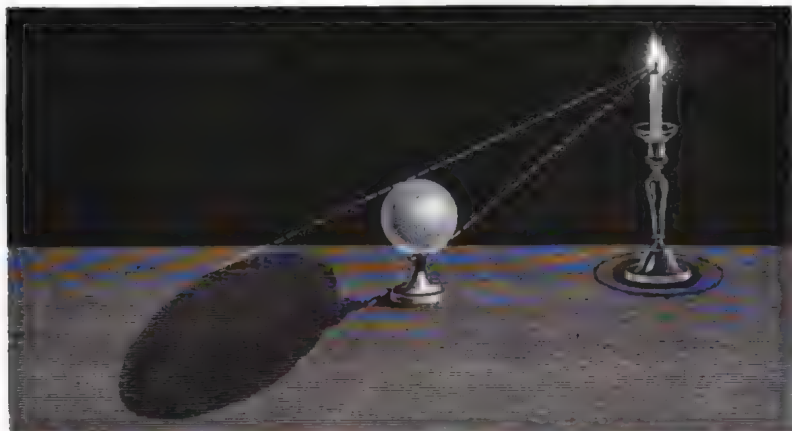


Fig. 614. — Ombre portée.

d'ombre par une surface donne lieu à une portion plus ou moins noire qui est ce qu'on appelle l'*ombre portée*.

Dans l'hypothèse où nous nous sommes placés d'un *point lumi-*

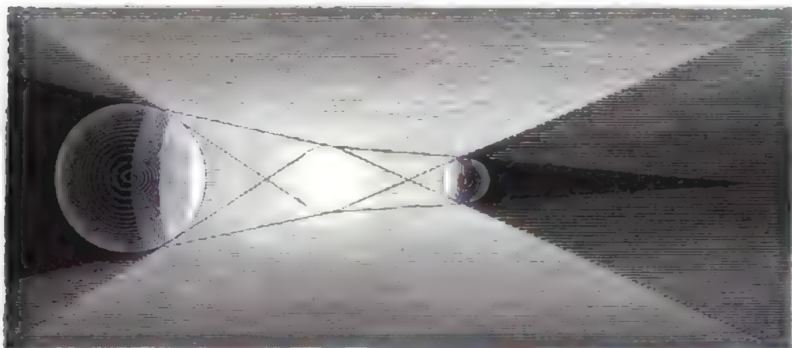


Fig. 615. — Ombre et pénombre.

neux, il est clair que le cône d'ombre est nettement limité ; il en est de même de l'ombre portée. Mais le cas d'un point lumineux est une pure abstraction, le corps lumineux a toujours des dimensions qui occasionnent une certaine complication dans le phénomène.

Considérons, par exemple (fig. 615), un corps lumineux placé entre deux corps opaques, dont l'un a un volume plus petit, et l'autre un volume plus grand que le sien. Concevons deux cônes dont les nappes enveloppent *extérieurement* le corps lumineux et chacun des deux corps opaques. L'intérieur de ces nappes au delà des corps opaques constitue le cône d'ombre. En aucun de ses points il ne peut arriver de lumière. L'intersection par un écran donne lieu à une partie noire, c'est l'ombre proprement dite. On voit que le cône d'ombre est illimité quand le corps opaque est plus grand que le corps lumineux; il est limité dans le cas contraire.

Concevons actuellement deux nouveaux cônes tangents *intérieurement* au corps lumineux et aux corps opaques; les nappes de ces cônes enveloppent évidemment les cônes d'ombre, comme le montre la figure. On voit en outre que, dans la portion de l'espace comprise entre les deux nappes, il arrive une certaine proportion de lumière, d'autant plus grande qu'on s'approche davantage de la nappe extérieure, d'autant plus petite qu'on s'approche davantage de la nappe intérieure. Cette portion de l'espace se nomme la pénombre. Si on considère l'ombre portée sur un écran. on voit qu'elle se compose de deux parties distinctes : une partie noire centrale, c'est l'ombre proprement dite, et une partie grise qui l'enveloppe, c'est la pénombre.

Cette pénombre est sensible sur le corps opaque lui-même. En effet, la ligne de contact du cône d'ombre est plus éloignée que celle du cône de pénombre. Au delà de la première, aucune lumière n'arrive; la portion comprise en avant de la deuxième est pleinement éclairée. Quant à la partie comprise entre les deux lignes, elle est le siége d'un éclairement partiel, qui forme précisément la pénombre.

685. Vitesse de la lumière. — Les ondes lumineuses, à la différence de ce qui a lieu pour le son, se propagent avec une extraordinaire rapidité, qu'on peut très-approximativement évaluer à 298,000 kilomètres par seconde; on voit, par conséquent, qu'en une seconde la lumière ferait environ sept fois et demie le tour de la terre. Une pareille vitesse semble interdire l'espoir de la mesurer par des expériences faites à la surface du globe. On y a toutefois

réussi. M. Foucault a pu même installer son appareil dans une chambre de dimensions ordinaires, où le rayon lumineux étudié ne parcourait pas plus de 20 mètres. Le temps employé pour franchir cet intervalle est inférieur à $\frac{1}{10\,000\,000}$ de seconde, et pourtant il a pu être mesuré avec exactitude! Avant l'expérience de M. Foucault, la vitesse de la lumière avait été déjà mesurée par M. Fizeau en opérant sur une longueur de quelques kilomètres. Nous allons essayer de donner une idée de ces deux mémorables expériences.

686. Expérience de M. Fizeau. — Supposons une source lumineuse placée à une certaine distance d'un miroir plan, perpendiculaire à la direction de la ligne qui aboutit au point où il est placé : les rayons lumineux, qui, partis de la source, viendront rencontrer le miroir plan, se réfléchiront normalement et retourneront à la source. Un observateur placé derrière celle-ci recevra donc le rayon réfléchi, et par suite verra un point lumineux, image de la source lumineuse. Imaginons maintenant qu'au-devant de la source on fasse tourner une roue dentée, d'un mouvement uniforme. Au moment où la rotation amène une dent au-devant de la source, la lumière est interceptée ; elle passe librement, au contraire, quand c'est l'intervalle vide entre deux dents. Or, dans ce second cas, on conçoit que si la vitesse de rotation de la roue est assez considérable, les rayons lumineux, à leur retour du miroir, puissent rencontrer précisément une dent ; dans ce cas, l'œil n'apercevra pas d'image. Si l'on connaît la vitesse de la roue, et le nombre de dents, on pourra en déduire le temps que met la lumière à parcourir le double de la distance qui sépare les deux stations. Dans le cas où la vitesse n'est pas exactement celle qui correspond à la disparition de la lumière, l'œil aperçoit d'une manière continue un point lumineux à cause de la persistance des impressions sur la rétine, mais avec une intensité moindre que quand le point lumineux est vu directement à travers les dents de la roue immobile. La roue employée par M. Fizeau avait 720 dents ; les deux stations, l'une à Suresnes, l'autre à Montmartre, étaient distantes de 8663 mètres, et la disparition de la lumière avait lieu pour une vitesse de 12.6 tours par

seconde. Il résulte de là que la roue met à tourner d'une quantité angulaire correspondante à la largeur d'une dent un temps égal à $\frac{1}{2 \times 720 \times 12,6} = \frac{1}{18144}$ de seconde. Or c'est précisément le temps que la lumière emploie à parcourir un espace égal à $2 \times 8663 = 17326$ mètres. Donc dans une seconde l'espace parcouru serait $17326 \times 18144 = 314\,262\,944$ mètres, environ 315 000 kilomètres par seconde. Ce nombre, peu éloigné de celui qui résulte des anciennes observations de Rœmer, est toutefois un peu trop fort, ainsi que cela résulte des nouvelles mesures de la parallaxe solaire, d'accord elles-mêmes avec l'expérience directe de M. Foucault.

Si la vitesse de la roue qui produit une extinction devient double, les rayons lumineux arriveront sur des vides, et on observera de nouveau l'image du point; à une vitesse triple correspondra une nouvelle éclipse, et ainsi de suite. On pourra donc faire une série de déterminations, qui conduisent à peu près au même résultat numérique.

Nous n'avons, dans ce qui précède, indiqué que le principe de l'expérience; on conçoit que des précautions particulières doivent



Fig. 616. — Expérience de M. Fizeau.

être prises pour que les rayons ne se disséminent pas dans l'espace et puissent à leur retour avoir une intensité suffisante pour impressionner l'œil. La figure 616 donne l'idée de l'appareil à l'aide duquel a été résolue cette difficulté.

La lumière d'une lampe est concentrée d'abord à l'aide d'une

lentille et vient tomber sur une glace sans tain M inclinée à 45° qui les renvoie normalement dans un corps de lunette ; l'objectif, placé convenablement, les rend ensuite parallèles ; ils traversent alors l'espace compris entre les deux stations, tombent sur une seconde lentille qui les concentre sur le miroir où ils se réfléchissent, traversent de nouveau les lentilles et redeviennent parallèles. Ils pénètrent à leur retour dans la première lunette, traversent la glace sans tain et sont reçus par l'œil, qui regarde à l'aide d'un oculaire. La roue R est mise en mouvement par un rouage d'horlogerie. Les figures 617, 618 et 619 montrent le point lumineux vu à travers les dents de la roue immobile, l'éclipse totale produite par une certaine

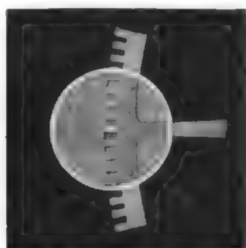


Fig. 617. — Point lumineux vu à travers les dents de la roue immobile.



Fig. 618. — Éclipse totale.

Fig. 619. — Eclipse partielle.

vitesse de rotation et l'éclipse partielle. Remarquons que le phénomène de l'éclipse totale, qui sert précisément à mesurer la vitesse de la lumière, est un peu incertain ; il ne devrait correspondre qu'à une vitesse bien déterminée de la roue ; mais il paraît durer plus ou moins de temps, parce que de part et d'autre du point précis de l'éclipse il n'arrive pas assez de lumière à l'œil pour l'impressionner. L'expérience de M. Fizeau, qui a rendu sensible pour la première fois la transmission progressive de la lumière, sur une étendue restreinte à la surface du globe, est, à ce point de vue, très-remarquable, et elle fit dans le monde savant une sensation extrême ; mais elle est difficile, peut-être impossible à disposer pour une mesure rigoureuse. La méthode employée plus tard par M. Foucault est, au contraire, susceptible d'une très-grande rigueur.

687. Expérience de M. Foucault. — M. Foucault a eu recours à la méthode du miroir tournant, employée par M. Wheatstone à la

mesure de la durée de l'étincelle électrique (436). L'appareil primitif, qui lui servit seulement à constater la différence de vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau, était disposé de la manière suivante :

Un faisceau de lumière, pénétrant par une ouverture carrée, traverse presque immédiatement un réseau de fils fins de platine ; concentré par une lentille achromatique, il tombe avant sa convergence sur un miroir tournant. Dans l'une des positions de celui-ci, le faisceau réfléchi est dirigé sur un miroir sphérique concave dont le centre de courbure coïncide avec l'axe de rotation du miroir mobile; le faisceau revient donc sur le miroir plan, et de là il retourne à l'ouverture. Pour observer cette image sans masquer le faisceau d'origine, on place obliquement sur le faisceau une glace parallèle, et on observe avec un puissant oculaire l'image rejetée sur le côté. Le miroir en tournant fait paraître cette image à chaque révolution. Si la vitesse de rotation est uniforme, et d'ailleurs assez rapide, la persistance des impressions sur la rétine fait voir l'image d'une manière continue et dans une position fixe. Pour obtenir un pareil résultat, il suffit que la vitesse de rotation dépasse 30 tours par seconde.

Mais si l'on suppose que la vitesse devienne plus considérable, entre les deux réflexions sur le miroir mobile, la lumière a parcouru le double de l'espace qui sépare les deux miroirs, et pendant ce temps le miroir tournant peut changer sensiblement de position, ce qui se trahit par un déplacement de l'image formé par le faisceau réfléchi à son retour sur le réseau.

C'est ce déplacement que M. Foucault a constaté en donnant au miroir une vitesse de 7 à 800 tours par seconde. En interposant entre les deux miroirs un tube contenant de l'eau, on constate que, toutes choses égales d'ailleurs, le déplacement est plus considérable, ce qui prouve que la lumière se meut plus vite dans l'air que dans l'eau, conformément à la théorie qui admet que la lumière est une vibration.

L'expérience précédente fut exécutée par M. Foucault en 1850, très-peu de temps après celle de M. Fizeau. Depuis cette époque, la méthode a été notablement perfectionnée, surtout en ce qui con-

cerne la vitesse de rotation du miroir, qui est évidemment l'élément numérique capital dans la question. La machine motrice du miroir est une soufflerie à pression constante du système de M. Cavaillé-Coll, animant par son air comprimé une sorte de sirène dont l'axe vertical porte le miroir. Au lieu de mesurer la vitesse de rotation par des procédés toujours empreints d'une certaine incertitude, M. Foucault s'est attaché à lui donner une vitesse constante et certaine, 400 tours par seconde. Cette vitesse, plus petite que celle des premières expériences, est toutefois suffisante, parce que le trajet de la lumière a été porté de 4 à 20 mètres en faisant réfléchir le faisceau sur plusieurs miroirs.

Un mécanisme d'horlogerie fait mouvoir un disque denté et lui fait faire exactement un tour en une seconde. Les dents sont au nombre de 400, de sorte que chacune d'elles met à passer de la position qu'elle occupe à celle de la dent voisine $\frac{1}{400}$ de seconde. La denture pénètre en partie dans le champ du microscope qui sert à observer l'image du réseau. Cette image, bien que produisant sur l'œil une impression continue, n'est toutefois éclairée que par intermittences à chaque révolution du miroir; il en est de même de la denture. Or, si l'on suppose que le miroir tournant fasse exactement 400 tours par seconde, les dents occuperont le même point du champ de la vision à chaque éclairement, et par suite la roue paraîtra absolument immobile. Si la vitesse diffère un peu de celle de 400 tours par seconde, on verra la roue tourner dans un sens ou dans un autre. On pourra donc en réglant la soufflerie arriver à obtenir l'immobilité absolue de l'image de la roue; on sera dès lors parfaitement sûr que le miroir se meut *rigoureusement* avec une vitesse de 400 tours par seconde.

C'est à l'aide de cette admirable combinaison que M. Foucault a pu mesurer exactement la vitesse de la lumière, qu'il a trouvée égale à 298,000 kilomètres par seconde; cette vitesse, un peu plus faible que celle qui avait été admise jusqu'à présent, se trouve dans un accord remarquable avec la nouvelle valeur de la parallaxe solaire qui résulte des derniers travaux sur la théorie du soleil.

688. Vitesse de la lumière déduite de l'observation des

éclipses des satellites de Jupiter. — Jusqu'à l'époque où a été exécutée l'expérience de M. Fizeau, on n'avait pu réussir à rendre sensible la transmission successive de la lumière par des expériences faites à la surface de la terre ; mais le fait était connu, on l'avait déduit de certains phénomènes astronomiques qui avaient même pu servir à mesurer avec assez d'exactitude cette vitesse de transmission. C'est à l'astronome danois Rœmer, venu en France avec Picard en 1672, qu'est due cette importante découverte. Il y a été conduit par la discussion des heures auxquelles se produisent les éclipses du premier satellite de Jupiter.

On sait que Jupiter est entouré de quatre satellites qui se meuvent à peu près dans le plan de l'orbite de la planète. Il résulte de là que, lorsque le satellite passe derrière la planète par rapport au soleil, il pénètre dans le cône d'ombre de celle-ci et s'éclipse. Ces éclipses peuvent être observées très-aisément, même avec des lunettes d'un pouvoir grossissant faible. Suivant la position relative de la Terre et de Jupiter, on peut observer soit l'entrée dans le cône d'ombre, c'est-à-dire l'*immersion*, soit la sortie ou l'*émersion*, mais on n'observe pas les deux phénomènes à la fois pour la même éclipse, parce qu'une partie du cône d'ombre nous est masquée par le corps de la planète. Malgré cette circonstance on a pu, en combinant les diverses observations, calculer avec une très-grande exactitude l'intervalle moyen de deux éclipses. C'est ainsi qu'on a reconnu que pour le premier satellite cet intervalle est égal à 42 heures 1/2 environ.

Cela posé, imaginons que la terre soit en T, Jupiter en J, c'est-à-dire que les deux astres soient en conjonction (fig. 620) ; la distance qui les sépare est alors la plus petite possible. Les deux planètes se meuvent, mais la terre a un mouvement beaucoup plus rapide, de sorte que, lorsque Jupiter sera venu en J′, la terre sera en T′, en opposition ; ce sera le moment de la plus grande distance entre eux. Pendant toute cette période la distance des deux planètes aura été en augmentant. Or, si l'on examine les intervalles successifs des éclipses, on trouve qu'ils sont tous supérieurs à 42 heures 1/2, c'est-à-dire à la valeur moyenne. A partir de cette opposition, les deux astres se rapprochent jusqu'à une nouvelle conjonction qui

se produit lorsque Jupiter est en J'' et la terre en T''. Pendant cette période l'intervalle des éclipses est, au contraire, constamment plus petit que 42 heures 1/2. C'est cette double variation en sens inverse que Rœmer établit rigoureusement en comparant et discutant toutes les observations faites jusqu'à lui. Or, si l'on admet que la lumière ne se transmet pas instantanément, les particularités précédentes deviennent faciles à comprendre. Car d'une immersion à la suivante, quand les astres se rapprochent, il doit s'écouler moins de temps que lorsque les astres s'éloignent, la différence étant précisément le temps que la lumière met à parcourir la différence de distance des astres d'une position à l'autre. De plus, si l'on fait la somme de toutes ces différences d'une conjonction à une opposition, ou d'une opposition à une conjonction, on trouve qu'elle est égale à une vingtaine de minutes. C'est le temps que met la lumière à parcourir un intervalle à peu près égal à la différence de la distance maxima à la distance minima des deux planètes, c'est-à-dire au diamètre de l'orbite terrestre. Nous disons à peu près, parce que les deux astres ne s'éloignent pas l'un de l'autre ou ne se rapprochent pas suivant une direction rectiligne. Mais il est facile d'interpréter ces observations d'une manière tout à fait précise.

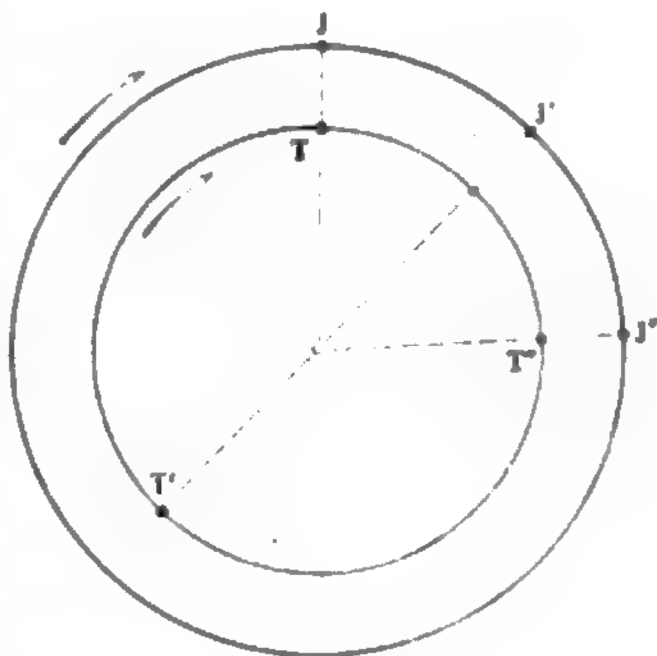


Fig. 620.

Supposons la terre et Jupiter en conjonction en T et en J ; on observe une éclipse du satellite et on note l'instant exact t où l'éclipse apparaît. Cet instant n'est pas l'instant réel θ ; il en diffère du temps α que la lumière a mis à parcourir l'espace JT ; on a donc la relation

$$t = \theta + \alpha. \qquad (1)$$

A l'opposition suivante en J' et T' on aura une relation analogue :

$$t' = \theta' + \alpha'. \qquad (2)$$

Enfin à la conjonction suivante en T'' et J'' ou

$$t'' = \theta'' + \alpha. \qquad (3)$$

α a la même valeur dans les équations (1) et (3) puisque JT est très-sensiblement égal à J''T''.

Retranchant membre à membre l'équation (1) de l'équation (2) et l'équation (2) de l'équation (3), on a

$$t' - t = \theta' - \theta + \alpha' - \alpha,$$
$$t'' - t' = \theta'' - \theta' - (\alpha' - \alpha),$$

d'où, en retranchant ces dernières l'une de l'autre :

$$t' - t - (t'' - t') = (\theta' - \theta) - (\theta'' - \theta') + 2(\alpha' - \alpha).$$

Mais $\theta' - \theta$ est égal à $\theta'' - \theta'$ et $\alpha' - \alpha$ représente le temps que la lumière met à parcourir l'orbite terrestre. Ce temps peut donc se déduire de l'équation précédente.

C'est ainsi que Rœmer a trouvé une valeur égale à 16 minutes 36 secondes; on en conclut que la lumière emploie pour venir du soleil à la terre 8 minutes 18 secondes.

Le mémoire de Rœmer fut présenté à l'Académie des sciences en 1676; cinquante ans plus tard l'astronome anglais Bradley découvrait l'aberration et en tirait relativement à la vitesse de la lumière des conclusions tout à fait conformes à celles du savant danois[1].

689. Photométrie. — La photométrie a pour objet la mesure de l'intensité lumineuse de diverses sources; les procédés employés à cet effet sont tous plus ou moins défectueux; l'œil n'est pas en effet plus habile à apprécier l'intensité de la vibration lumineuse que l'oreille ne l'est à apprécier celle de la vibration sonore. La difficulté est même à peu près absolue quand les lumières à comparer ont des couleurs différentes.

Quand les lumières ont à peu près la même teinte, on peut établir approximativement le rapport de leurs intensités en se fon-

1. On appelle *aberration* la différence qui existe entre la ligne de visée d'une lunette dirigée sur une étoile et la ligne réelle aboutissant à cette étoile. Cette différence est due à la vitesse de la lumière et à la vitesse de translation de la terre.

dant sur la loi de la variation en raison inverse du carré des distances. Cette loi est une conséquence directe de la théorie des vibrations lumineuses et on l'admet *à priori* bien plutôt qu'on ne la démontre expérimentalement. Toutefois on pourrait constater à peu près qu'une surface donnée est *également éclairée* soit par une source, soit par quatre sources pareilles placées à une distance double. Quoi qu'il en soit, c'est sur cette loi que sont fondées la plupart des méthodes photométriques ; nous en indiquerons succinctement quelques-unes.

690. Photomètre de Bouguer. — Une surface blanche, une feuille de papier, par exemple, un verre dépoli, ou une lame mince

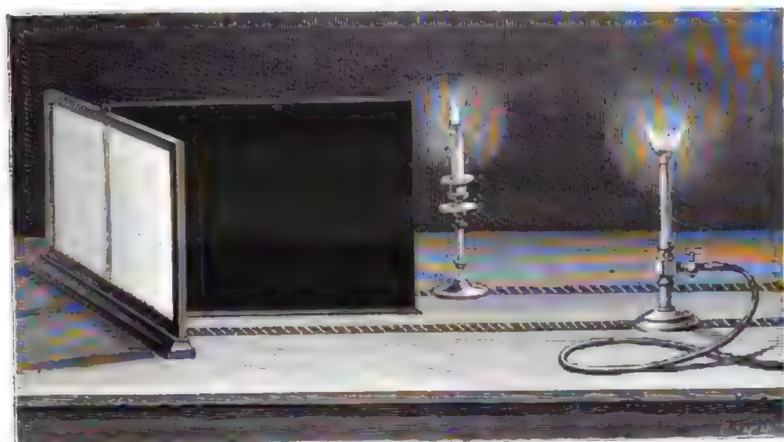


Fig. 621. — Photomètre de Bouguer.

de porcelaine, est divisée en deux parties par un écran opaque, de part et d'autre duquel on place les deux sources. La disposition doit être telle, que chaque source éclaire exclusivement l'une des surfaces. L'observateur placé du côté opposé aux lumières voit deux surfaces blanches, séparées par une ligne d'ombre due à l'écran. On éloigne la source la plus intense, jusqu'à ce que l'éclairement des deux surfaces paraisse le même. Si alors l'une des sources se trouve à une distance double, elle envoie quatre fois moins de lumière que si elle était placée à la même distance que l'autre, et puisqu'elle produit en définitive un éclairement égal, c'est que son intensité est quadruple.

691. Photomètre de Rumford. — Le photomètre de Rumford est fondé sur la comparaison des teintes de deux ombres portées par deux lumières. Au-devant des deux lumières on place un bâton cylindrique dont l'ombre est projetée sur un écran. Chacune des

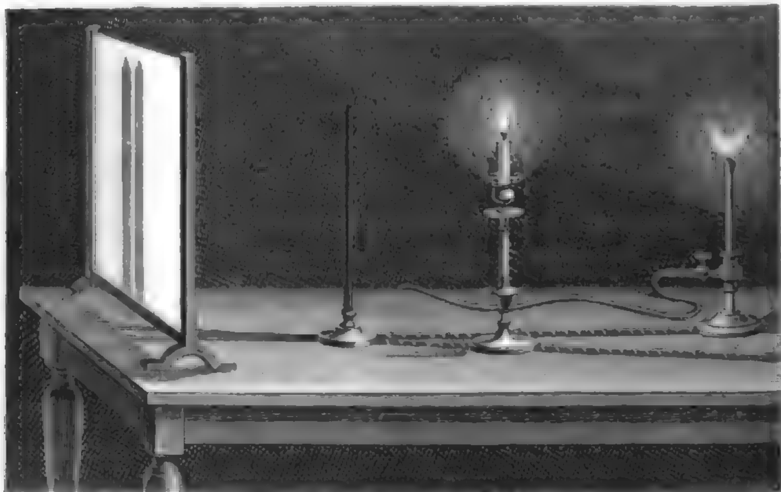


Fig. 622. — Photomètre de Rumford.

deux ombres portées par une des sources est éclairée par l'autre, et leur teinte est généralement différente. On éloigne progressivement la source la plus intense, jusqu'à ce qu'elles paraissent exactement du même noir. On doit conclure que dans cette position chacune d'elles reçoit la même quantité de lumière. Si donc on constate que l'une des sources est à une distance double de l'autre, par exemple, c'est que son intensité est quatre fois plus grande.

692. Photomètre de M. Foucault. — Le photomètre de M. Foucault est une modification de celui de Rumford. Il se compose d'une boîte présentant un fond en glace dépolie et divisée en deux compartiments par une cloison mobile. Les deux lumières sont placées du côté opposé à la glace, dans une position symétrique par rapport à la cloison. D'après cette disposition, chaque lumière projette sur l'écran une ombre de la cloison, et ces deux ombres peuvent ou empiéter l'une sur l'autre, ou être séparées par un intervalle lumineux, ou être tangentes. A l'aide d'un bouton destiné à cet effet, on

fait mouvoir l'écran jusqu'à ce que les ombres se touchent, et il est facile alors de juger de l'instant où, par suite de l'éloignement de la lumière la plus intense, les deux ombres ont la même teinte.

693. Photomètre de Bunsen. — Le photomètre de Bunsen se compose d'une feuille de papier tendue sur un cadre et présentant en son milieu une tache faite avec un corps gras. Si l'on place la feuille entre l'œil et une source de lumière, la tache paraît translucide et blanche sur un fond peu éclairé ; si, au contraire, on place la source entre l'œil et la feuille, la tache paraît sombre sur un fond blanc. Supposons d'après cela que l'on place de part et d'autre de la feuille deux sources d'inégale intensité, par exemple une bougie et un bec de gaz : en regardant la feuille du côté de la bougie, on verra la feuille éclairée par diffusion et la tache par transmission, et cette dernière sera plus brillante, puisque le bec de gaz a une lumière plus intense. Mais si on l'éloigne à une distance suffisante, il arrivera un moment où le papier paraîtra uniformément éclairé et où la tache disparaîtra à peu près complétement ; c'est que l'éclairement produit par les deux sources sera le même. Il suffira donc de mesurer leurs distances au photomètre pour en déduire le rapport de leurs intensités.

CHAPITRE LVIII.

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.

694. Réflexion. — Si l'on fait pénétrer dans l'intérieur d'une chambre noire un faisceau délié de lumière solaire AB (fig. 623) et qu'on le fasse tomber sur une surface plane présentant un certain degré de poli, on voit le faisceau se relever suivant la direction BC : c'est en

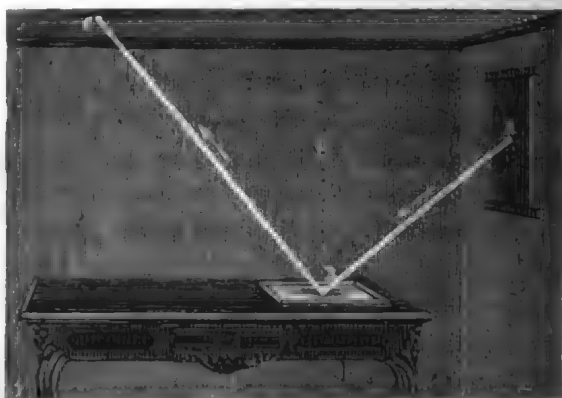


Fig. 623. — Réflexion de la lumière.

cela que consiste la réflexion. AB se nomme le rayon incident, BC le rayon réfléchi. L'angle ABD formé par le rayon incident et la perpendiculaire ou normale à la surface BD se nomme l'angle d'incidence. L'angle CBD formé par le rayon réfléchi et la même normale est l'angle de réflexion. On appelle plan d'incidence le plan formé par le rayon incident AB et la normale BD.

695. Lois de la réflexion. — La réflexion de la lumière à la surface des corps polis se fait suivant les lois suivantes :

1° La réflexion a lieu dans le plan de l'incidence;

2° L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.

On vérifie expérimentalement ces deux lois de la manière suivante : On se sert d'un limbe vertical divisé (fig. 624), au centre duquel se trouve une petite plaque polie que l'on rend exactement horizontale à l'aide d'un niveau à bulle. Sur le limbe se meuvent deux curseurs portant deux tubes noircis à l'intérieur et munis de lignes de visée exactement dirigées vers le centre du limbe. Ces lignes de visée sont ordinairement formées par des ouvertures très-étroites. Le zéro de la division du cercle est placé à l'extrémité du diamètre vertical passant par le centre, et cette division s'étend symétriquement de part et d'autre. Les curseurs sont munis de points de repère correspondant aux lignes de visée des tubes.

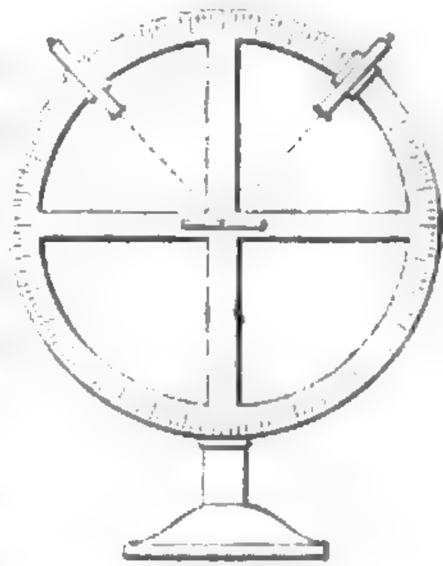


Fig. 624. — Vérification des lois de la réflexion.

Pour faire l'expérience, on place devant l'extrémité extérieure de l'un des tubes la flamme d'une bougie, par exemple. Une portion de la lumière envoyée par cette source pénètre dans le tube en formant un faisceau ayant précisément la direction de la ligne de visée, car les rayons d'une direction différente sont arrêtés et absorbés par les parois intérieures qui sont noircies.

En faisant mouvoir le second tube et plaçant l'œil derrière son extrémité, on arrive toujours à trouver une position qui permet de voir la lumière de la bougie réfléchie par la petite surface plane. Or on reconnaît que les deux curseurs sont placés à la même distance du zéro, ce qui démontre l'égalité de l'angle de réflexion et de l'angle d'incidence. D'ailleurs la réflexion se fait dans le plan vertical du limbe qui est précisément le plan de l'incidence. Les deux lois de la réflexion se trouvent donc vérifiées.

696. Horizon artificiel. — Les lois de la réflexion de la lumière sont le fondement d'une méthode très-usitée pour la mesure de la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon, et dont

l'exactitude reconnue peut être considérée comme la vérification de ces lois elles-mêmes.

On se sert d'un cercle divisé (fig. 625), établi par des procédés convenables dans un plan vertical. On dirige une lunette munie



Fig. 625. — Horizon artificiel

d'une ligne de visée suivant la direction I'S' et de façon à voir une étoile déterminée. On dirige ensuite ou une seconde lunette si l'instrument en présente une, ou celle qui a servi pour la précédente expérience, suivant la direction I'R, de façon à apercevoir l'image de l'étoile par réflexion à la surface d'un bain de mercure. En admettant l'exactitude des lois de la réflexion de la lumière, la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon est la moitié de la distance angulaire qui sépare les deux lunettes.

En effet, l'image de l'étoile observée par réflexion est fournie

par la réflexion d'un rayon lumineux IS parallèle à I'S' à cause de l'extrême distance de l'étoile. Les deux angles SIN et NIR sont égaux; il en est de même des angles S'I'N', N'I'R' qui sont égaux aux premiers en vertu des propriétés des parallèles. Or, si l'on conçoit en I' une droite horizontale perpendiculaire à I'N', cette droite divise évidemment en deux parties égales l'angle S'I'R. et la moitié supérieure est précisément la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon.

Ce procédé pour mesurer la hauteur d'un astre est souvent employé, soit dans les observatoires, soit dans les stations géodésiques; on le désigne sous le nom d'*horizon artificiel* ou *horizon de mercure*.

697. Réflexion irrégulière. — La réflexion dont il vient d'être question porte le nom de réflexion régulière; elle est d'autant plus marquée que la surface est plus polie et que les rayons sont plus inclinés. Il y a une autre sorte de réflexion appelée diffusion, en vertu de laquelle une surface frappée par un faisceau de lumière devient le siége de faisceaux dirigés dans toutes les directions de l'espace. C'est à raison de cette diffusion que les corps *éclairés* sont visibles et peuvent être considérés comme des corps lumineux. S'il n'y avait que la lumière régulièrement réfléchie, on verrait non pas les corps, mais bien la source qui les éclaire. Ainsi un observateur qui se placerait sur le trajet d'un rayon solaire réfléchi verrait l'image éblouissante du soleil et ne verrait pas le miroir. C'est la diffusion qui rend celui-ci visible. Ajoutons que dans l'acte même de la diffusion il s'établit dans le faisceau une modification spécifique à la suite de laquelle les faisceaux qui proviennent du corps ont une intensité ou une couleur qui dépend de la nature du corps lui-même.

698. Miroirs. — On donne le nom de *miroir* à toute surface polie capable de réfléchir la lumière et de donner lieu à des images de formes diverses. Les anciens se servaient exclusivement de miroirs en métal, ordinairement en bronze, mais quelquefois en argent ou même en or. L'usage des miroirs en glace étamée remonte au XIIe siècle. Ce sont des lames de verre ou de glace derrière lesquelles on applique un amalgame d'étain (tain) qui forme la surface réfléchissante. De cette façon celle-ci se trouve soustraite

à l'altération de l'air, ce qui est un avantage considérable. Toutefois le tain et la surface du verre forment en réalité deux miroirs et donnent par suite deux images, ce qui dans les expériences d'optique constitue un inconvénient tout à fait intolérable : aussi dans ce cas se sert-on de miroirs métalliques. Le métal des miroirs est une sorte de bronze formé de 66 parties de cuivre et 33 d'étain. On y ajoute quelquefois du plomb, de l'antimoine et même de l'arsenic. Les miroirs en verre argenté, fort employés aujourd'hui, sont bien supérieurs aux précédents. On a essayé aussi, mais sans beaucoup de succès, des miroirs en verre platiné.

Les effets produits par les miroirs dépendent de leur forme; nous examinerons ici seulement avec quelques détails les miroirs plans et les miroirs sphériques.

699. Miroir plan. — Le miroir plan est une surface plane réfléchissante; son effet général et bien connu est de donner lieu derrière le miroir à une image pareille à l'objet. Les lois de la réflexion de la lumière rendent très-aisément compte de ce fait.

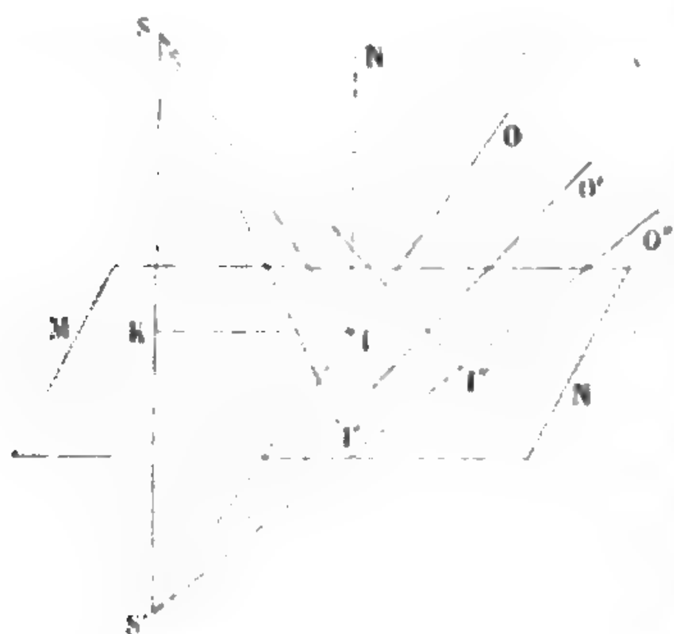


Fig. 626. — Miroir plan.

Soit en effet un miroir plan MN et un point lumineux S. De ce point partent différents rayons, SI, SI′, SI″, qui se réfléchissent sur le miroir et donnent lieu aux rayons réfléchis IO, I′O′, I″O″. Abaissons du point S sur le miroir une perpendiculaire SK et prolongeons-la derrière le miroir. Prolongeons, d'autre part, le rayon réfléchi IO; ce rayon, étant situé dans le plan normal d'incidence SIN, ira couper quelque part en S′ la droite SK qui est dans le même plan. Cela posé, on voit que les deux triangles rectangles SKI, KIS′ sont égaux, car ils ont le côté KI commun; les deux angles SIK, KIS′ sont égaux, comme complémentaires, le premier de SIN, le second de NIO, et les deux angles SIN, NIO sont égaux d'après la loi de la réflexion; l'angle en K est d'ailleurs droit, les deux triangles considérés ont donc un côté égal adjacent à deux angles égaux; ils sont donc égaux,

et par suite KS′=KS. Mais ce qui est vrai pour le rayon IO l'est aussi pour tous les autres; donc tous les rayons réfléchis prolongés vont passer par le point S′ symétrique du point S. Il suit de là que, si quelques-uns de ces rayons arrivent à l'œil, celui-ci sera exactement impressionné comme s'ils venaient de S′; il verra donc en S′ un point lumineux image du point S.

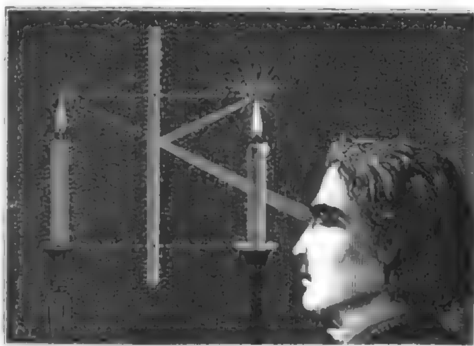


Fig. 627.

La figure 627 montre un pinceau de rayons lumineux partant d'un point de la flamme d'une bougie; le faisceau réfléchi divergent pénètre dans l'œil, et son sommet est précisément l'image du point considéré.

Ce qui est vrai pour un point particulier s'applique évidemment à chacun des points d'un objet. Si par exemple un objet AB est placé au-devant d'un miroir (fig. 628), l'œil situé en O verra l'image du point A en A′, celle du point B en B′, et par suite l'image de AB sera la ligne symétrique A′B′.

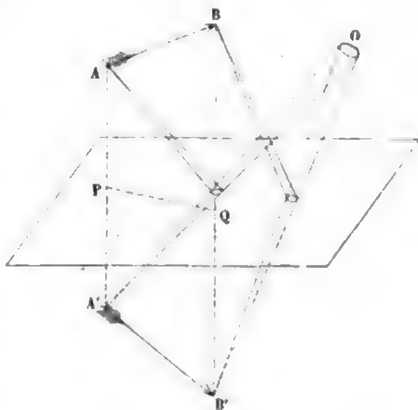


Fig. 628. — Image d'un objet.

On voit d'après cela que l'image vue dans un miroir plan n'est pas égale à l'objet dans le sens absolu du mot; elle est symétrique de l'objet, c'est-à-dire que ses différents points sont sur les perpendiculaires abaissées des points correspondants de l'objet et prolongées d'une quantité égale derrière le miroir. Ainsi, ce qui est à droite dans l'objet est à gauche dans l'image, *et vice versa*; une personne placée devant un miroir et mouvant son bras droit voit son

image mouvoir le bras gauche; les caractères d'imprimerie sont vus renversés tels qu'ils se trouvent sur la forme d'impression, ou comme on les verrait par transparence en regardant derrière la feuille de papier qui les porte, etc.

700. Miroirs multiples. — Lorsque des rayons provenant d'un point lumineux m et déjà réfléchis sur un premier miroir AB viennent se réfléchir sur un second CD, ils donnent lieu derrière ce second miroir à une image m'' symétrique de la première m', car au moment où ils tombent sur lui, ils ont pour point de concours la première image, qui joue par conséquent le rôle d'un point lumineux. De même la réflexion sur un troisième miroir donnerait lieu à une troisième image symétrique de la deuxième, et ainsi de suite. On expliquera donc toutes les particularités des réflexions multiples en considérant successivement chaque image comme un objet. Nous citerons ici ce qui se produit entre deux miroirs parallèles et deux miroirs inclinés.

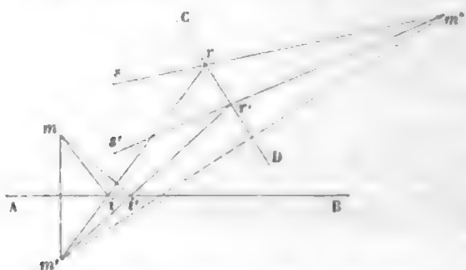


Fig. 629. — Miroirs multiples.

701. Miroirs parallèles. — Considérons un objet O placé entre deux glaces parallèles (fig. 630); une première réflexion sur chacune d'elles donne lieu aux images a_1 et o_1; une seconde réflexion donne lieu à deux nouvelles images a_2, o_2 dont la position s'obtient en considérant a_1 et o_1 comme objets; de même, à l'aide de a_2 et o_2, on trouvera la position des images a_3 et o_3 qui correspondent à une troisième réflexion, et ainsi de suite. La figure montre un œil recevant les faisceaux trois fois réfléchis qui donnent les images a_3 et o_3; mais le même œil reçoit les faisceaux qui ont subi une, deux et en général un nombre quelconque de réflexions; il apercevra donc une série pour ainsi dire indéfinie d'images, mais dont l'éclat va en décroissant, car à chaque réflexion il y a toujours une certaine perte de lumière.

Si les glaces sont bien parallèles, toutes ces images sont sur

une direction perpendiculaire à chacune d'elles; mais si les glaces forment un petit angle, la ligne des images tourne d'une façon

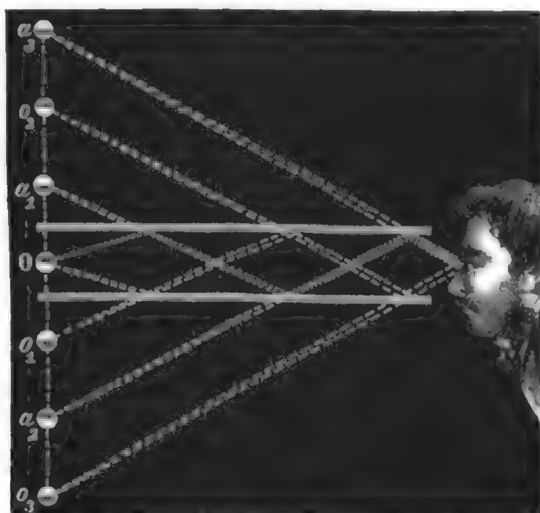


Fig. 630. — Miroirs parallèles.

d'autant plus marquée que l'angle est plus sensible. On se sert souvent de cette remarque pour placer deux glaces exactement parallèles l'une à l'autre.

702. Miroirs rectangulaires. — Considérons un point lumineux *m* placé entre deux glaces rectangulaires OA et OB. Il se formera par suite d'une première réflexion une image *m'* derrière OA et *m''* derrière OB. L'image *m'* étant considérée comme objet donnera lieu dans OA à une nouvelle image *m'''*, et il en sera de même de l'image formée derriere OB. Mais

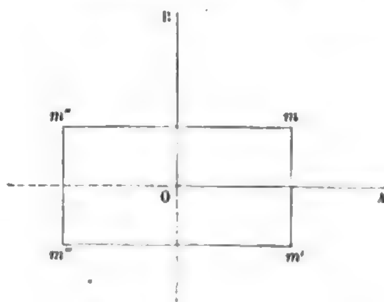


Fig. 631. — Miroirs rectangulaires.

il est évident que ces deux images coïncident en une seule qui est placée dans l'angle dièdre opposé à celui que forment les miroirs. Or celle-ci est placée de telle façon qu'elle ne saurait plus donner lieu à aucune image nouvelle, puisque les rayons qui y

aboutissent ne rencontrent plus les miroirs; il y aura donc en tout trois images, quatre en comptant le point lumineux. La figure 632

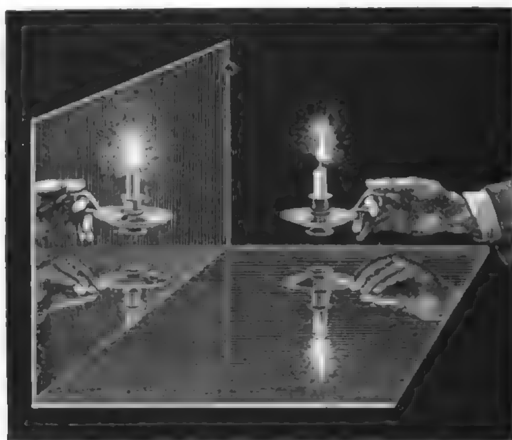


Fig. 632. — Miroirs rectangulaires.

montre dans leurs positions relatives véritables les images d'un objet placé entre deux glaces, l'une horizontale, l'autre verticale.

703. Miroirs inclinés à 45 degrés. — Cette conclusion, particulière au cas où l'angle formé par les miroirs est $\frac{1}{4}$ de la circonférence, s'applique aussi au cas plus général où cet angle est une partie aliquote quelconque de la circonférence. Si, par exemple, cet angle est de 45°, il y a, en comptant l'objet, huit images placées circulairement et situées chacune dans un des secteurs de 45° dans lesquels la circonférence totale peut être divisée.

La figure 633 montre nettement l'origine de ces images et la cause qui en limite le nombre. L'objet placé entre les deux miroirs donne par réflexion sur CB une image dans l'angle BCA'; la seconde réflexion sur AC donne une image symétrique dans l'angle B'CA''', celle-ci, à l'aide de la troisième réflexion sur CB, donne une image dans l'angle B'''CA'', et cette dernière fournit par réflexion sur AC une image dans l'angle B''CA''. Cet angle A''CB'', opposé à celui des miroirs, peut être appelé la région inefficace, car les droites qui aboutissent à un point quelconque de cette région, une fois dans l'angle des miroirs, ne les rencontrent plus ; la dernière

image que nous venons de mentionner ne peut donc en fournir de nouvelles.

Si nous considérons actuellement la première image formée par le miroir AC et qui se trouve dans l'angle B'CA, on voit que, considérée comme objet, elle donne une image symétrique dans l'angle B'''CA', celle-ci en donne une dans la région B''CA''', et cette dernière dans la région inefficace B''CA''. Mais la symétrie de la figure indique évidemment que cette dernière image coïncide avec celle qui a été mentionnée tout à l'heure, de sorte qu'il y a, en comptant l'objet, huit images disposées symétriquement.

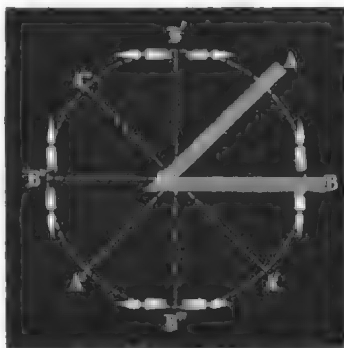


Fig. 633. — Images dans deux miroirs inclinés à 45°.

704. Kaléidoscope. — Les apparences observées dans les miroirs inclinés sont le fondement d'un petit instrument dont l'invention paraît due à Porta, mais qui a été perfectionné par Brewster. Il consiste en un tube dans lequel sont placés deux miroirs inclinés à 60° ordinairement; l'une des extrémités du tube est fermée par une plaque munie d'un petit trou qui sert à appliquer l'œil. A l'autre extrémité se trouvent deux plaques de verre, l'une transparente à l'intérieur; l'autre située vers l'extérieur est en verre dépoli. Entre ces deux plaques on place


Fig. 634. — Dessins du kaléidoscope.

de menus objets en verre coloré. L'image de ces objets est répétée symétriquement de part et d'autre des lignes qui divisent le champ de la vision en six secteurs. Si l'on fait tourner le tube, les objets prennent une disposition différente qui se reproduit dans chacune des images, ce qui permet de faire varier les dessins à l'infini. Moyennant quelques perfectionnements qui permettent d'en étendre et d'en varier les effets, le kaléidoscope peut être utilement appliqué à composer des dessins symétriques pour les châles.

On pourrait employer trois miroirs au lieu de deux ; on obtiendrait ainsi la superposition des effets particuliers à la combinaison des miroirs deux à deux. La figure 634 représente une des dispositions symétriques obtenues par un kaléidoscope à trois miroirs.

705. Applications diverses des miroirs plans. — La réflexion de la lumière sur un ou plusieurs miroirs diversement agencés peut donner lieu à des effets assez curieux qui sont décrits dans les anciens traités de physique amusante. On y trouve, par exemple, la disposition à employer pour voir de l'intérieur d'une chambre la personne qui frappe à la porte ; pour observer les travaux des assiégeants (*polémoscope*), etc. C'est par la combinaison de deux miroirs plans rectangulaires inclinés à 45° sur les parois d'une salle, qu'on produit le jeu optique connu sous le nom de *tête parlante*. L'image du sol et celle des parois se raccordent avec les objets eux-mêmes, et la tête d'une personne placée derrière les miroirs paraît isolée à la partie supérieure de ceux-ci.

Dans ces derniers temps, on a appliqué le miroir plan à la production d'un effet théâtral assez curieux ; c'est ce qu'on appelle les *spectres*. Sur une partie de la scène est disposée une glace sans tain qui, par suite de la demi-obscurité qu'on fait régner sur la scène, est invisible pour les spectateurs. Derrière elle se trouvent les acteurs qui figurent dans la pièce et que l'on aperçoit à travers la glace. En avant, dans une région soustraite aux regards du public, sont placés d'autres personnages qu'on éclaire vivement par un procédé convenable. Leur position est telle, que leur image va se former dans la partie de la scène occupée par les acteurs réels. Ces sortes de fantômes peuvent donc se mêler avec les personnages, exécuter divers mouvements en rapport avec la nature de la pièce, et

dans certaines circonstances on a pu produire ainsi des effets assez bizarres.

706. Miroirs sphériques. — Les miroirs sphériques sont des calottes sphériques formant une portion plus ou moins sensible, mais généralement assez petite de la sphère totale. Si la réflexion se fait à l'intérieur de la calotte, le miroir est appelé *concave*; il est *convexe* dans le cas contraire, c'est-à-dire quand la réflexion se fait à l'extérieur.

Rappelons ce que nous avons dit à propos de la chaleur rayonnante (310), que l'*axe principal* du miroir est la droite passant par le

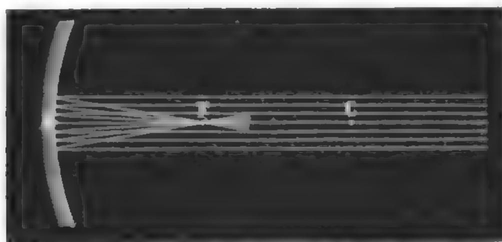


Fig. 635. — Foyer principal d'un miroir sphérique.

centre C de la sphère et le pôle A ou le sommet du miroir; cette droite est perpendiculaire au plan de section du miroir et de la sphère.

Quand des rayons lumineux arrivent parallèlement à l'axe principal, ils se réfléchissent suivant les lois indiquées plus haut (695), et viennent après la réflexion concourir en un point F que l'on appelle le *foyer principal*. Cette propriété, ainsi que cela sera expliqué plus loin, n'est qu'approximative dans le cas des miroirs sphériques; elle est tout à fait rigoureuse pour les miroirs paraboliques qui sont formés par une portion de paraboloïde de révolution voisine de son sommet. Aussi plusieurs savants et constructeurs ont-ils cherché par des procédés divers à obtenir rigoureusement cette forme parabolique pour les miroirs de télescope. On emploie aussi des miroirs paraboliques comme réflecteurs destinés à renvoyer les rayons lumineux provenant d'une source placée au foyer; mais dans cette application on se contente d'une surface parabolique plus ou moins approchée.

707. Foyers conjugués. — Revenons aux miroirs sphériques et supposons qu'un point lumineux P soit placé sur l'axe prin-

cipal. De ce point partent des rayons lumineux dans toutes les directions, et un faisceau limité par l'ouverture du miroir vient tomber sur celui-ci. Considérons en particulier le rayon incident PI, menons la normale OI, qui n'est autre chose que le rayon de la

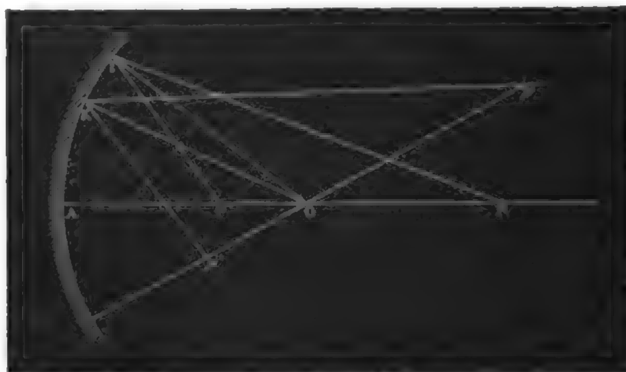


Fig. 636. — Théorie des foyers conjugués.

sphère; l'angle d'incidence est OIP. Pour avoir le rayon réfléchi, il suffit de mener de l'autre côté de OI et dans le plan OIP une droite IP' faisant avec IO un angle P'IO égal à PIO.

D'après cela la droite IO est bissectrice de l'angle PIP', ce qui donne d'après une propriété géométrique connue :

$$\frac{IP}{IP'} = \frac{PO}{P'O}.$$

Désignons par p la distance AP du point lumineux au sommet du miroir, par p' la distance AP', et par r le rayon du miroir. Remarquons d'ailleurs que, si l'ouverture angulaire du miroir est très-petite, ce qui a toujours lieu dans les miroirs de télescope, on pourra sensiblement confondre IP avec AP et IP' avec AP'. D'après ces remarques, l'équation précédente devient

$$\frac{p}{p'} = \frac{p-r}{r-p'}, \quad \text{d'où} \quad pr + p'r = 2pp' :$$

et par suite, en divisant tous les termes par $pp'r$:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{r}. \qquad (a)$$

Cette formule fait connaître la position du point P' où le rayon

réfléchi vient rencontrer l'axe ; on voit que, dans les limites de l'approximation qui a été adoptée dans le raisonnement, la position du point P' ne dépend que de la distance IP. On est donc conduit à cette conclusion importante expliquée par la figure 637 : *Tous les*

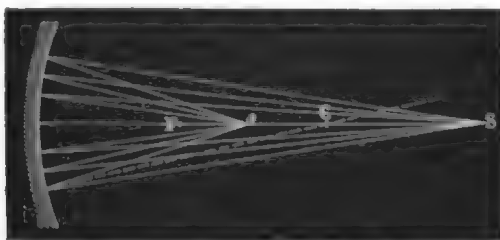


Fig. 637. — Foyers conjugués.

rayons lumineux partant d'un même point situé sur l'axe principal viennent après la réflexion concourir en un même point.

Il est évident que si les rayons lumineux partaient du point P', ils viendraient après la réflexion concourir en P ; à raison de cette réciprocité les points P et P' sont appelés *foyers conjugués.*

Nous avons supposé dans la démonstration le point P sur l'axe principal ; mais il est évident que le même raisonnement aurait pu être fait sur un point quelconque *p*. Seulement le foyer conjugué se trouverait dans ce cas en *p'*, sur le rayon passant par le point *p*. Toute droite passant par le centre porte par opposition à l'axe principal le nom d'*axe secondaire*. On peut donc énoncer la propriété générale suivante : *Lorsque des rayons lumineux partant d'un même point rencontrent un miroir sphérique concave, ils viennent après la réflexion se couper en un même point placé sur l'axe secondaire qui passe par le point lumineux.*

Cette propriété suffit pour comprendre comment un objet étant placé au-devant d'un miroir concave, l'œil placé convenablement devra apercevoir une image de l'objet. En effet, des différents points de l'objet partent des rayons lumineux qui, après la réflexion, viennent concourir à leurs foyers conjugués. Si donc l'œil est placé au delà de la région où se fait le concours, les rayons seront pour lui comme s'ils venaient des différents foyers conjugués ; l'ensemble de

ces foyers ou leur lieu géométrique produira l'effet d'un objet; ce sera l'image de l'objet lui-même.

708. Foyer principal. — Si dans la formule (a) des foyers conjugués on suppose que la distance p devienne de plus en plus grande $\frac{1}{p}$ décroît indéfiniment et devient nul pour une valeur infinie de p. C'est le cas où les rayons arriveraient parallèlement à l'axe; p' devient alors le foyer principal et sa valeur se déduit de la relation $\frac{1}{p'} = \frac{2}{r}$, d'où $p' = \frac{r}{2}$. *La distance focale principale est donc égale à la moitié du rayon du miroir.*

Cette propriété permettrait de trouver par une expérience optique très-simple le rayon de courbure du miroir; mais ce procédé n'est ni aussi commode ni aussi exact que le moyen géométrique ordinaire et surtout que l'emploi du sphéromètre. C'est précisément par la mesure du rayon de courbure que l'on détermine la distance focale.

Si l'on appelle f la distance focale principale du miroir, et qu'on remplace dans la formule (a) $\frac{r}{2}$ par f, celle-ci prend la forme suivante, qui est plus généralement usitée :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}. \qquad (b)$$

709. Discussion de la formule. — La discussion de la formule (b) permet de se rendre compte des positions relatives des deux foyers conjugués. On voit en effet que, si p est très-grand, p' est très-peu différent de f, c'est-à-dire que le foyer conjugué est très-voisin du foyer principal. A mesure que p diminue, p' augmente, c'est-à-dire que les deux foyers vont au-devant l'un de l'autre et s'approchent simultanément du centre où ils arrivent en même temps, car lorsque $p = 2f$, p' est aussi égal à $2f$. Il est évident d'ailleurs *à priori* que, si les rayons lumineux partent du centre, ils sont normaux à la surface de la sphère et reviennent par conséquent suivant la même direction.

Si le point lumineux dépasse le centre et s'avance vers le foyer principal, son foyer conjugué s'éloigne au delà du centre, c'est-à-

dire que p' continue à augmenter; et lorsque le point lumineux atteint le foyer principal, p' devient infini; en d'autres termes les rayons réfléchis sont parallèles à l'axe.

Considérons actuellement le cas où le point lumineux continuant à marcher viendrait occuper une position entre le foyer principal et le miroir. Dans ce cas, p étant plus petit que f, $\frac{1}{p}$ est plus grand que $\frac{1}{f}$; donc $\frac{1}{p'}$ et par suite p' doit être négatif. Cela veut dire que les rayons lumineux ne se coupent pas au-devant du miroir, mais leurs prolongements géométriques vont se couper derrière le miroir à une distance égale à la valeur absolue de p' tirée de l'équation aux foyers. C'est ce que montre la figure 638;

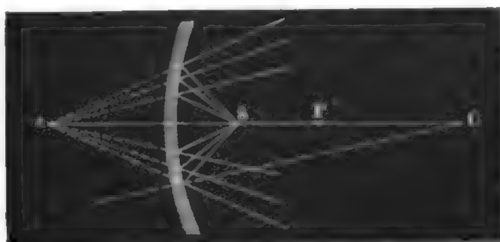


Fig. 638. — Foyer virtuel.

S'est la position du point lumineux, s est son foyer conjugué. On dit dans ce cas que le foyer est *virtuel*. Le foyer est appelé réel quand il résulte du concours des rayons lumineux.

710. Formation des images.—Les explications précédentes suffisent pour l'intelligence de toutes les particularités relatives à la formation des images. Considérons, par exemple (fig. 639), un objet AB placé au-devant du miroir concave et au delà du centre. Du point A partent des rayons lumineux qui, après la réflexion, viennent concourir en un point conjugué a. Ce point est d'ailleurs facile à déterminer. Il suffit de mener par le point A le rayon parallèle à l'axe qui, après la réflexion, vient passer au foyer principal; son intersection avec l'axe secondaire AC est évidemment le point cherché. Une construction analogue donne le foyer conjugué b du point B. Les points compris entre A et B ont évidemment leurs foyers conjugués dans les points intermédiaires entre a et b. Donc un œil

placé au delà de *ab* recevra les rayons qui viennent des différents points de *ab* et apercevra, par conséquent, une image renversée *ab* de l'objet. Il est évident que si l'objet était *ab*, l'image serait précisément formée par AB pour un œil qui serait placé au delà de cette ligne.

711. Grandeur des images. — La figure permet de calculer les rapports de grandeur de l'image et de l'objet. En effet, les deux

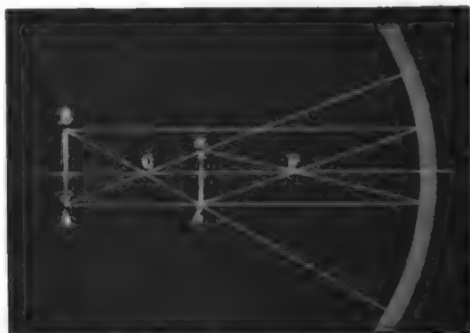


Fig. 639. — Image formée par un miroir concave.

triangles ABC et *ab*C étant semblables, on voit que le rapport de AB à *ab* est le même que le rapport des distances de ces deux lignes au centre, rapport qui est égal à $\frac{p-2f}{2f-p'}$; on a donc la relation

$$\frac{AB}{ab}=\frac{p-2f}{2f-p'}.$$

Mais on tire de la formule fondamentale

$$p'=\frac{f}{p-f},$$

et en substituant dans la formule précédente, il vient

$$\frac{AB}{ab}=\frac{p-f}{f}.$$

Cette formule montre clairement que si p est plus grand que $2f$, c'est-à-dire si l'objet est au delà du centre, le second membre est plus grand que l'unité et par conséquent l'image est plus petite que l'objet. Ce serait évidemment le contraire si l'objet était placé

entre le centre et le foyer principal. On peut donc formuler la proposition suivante : *Quand un objet est placé au-devant d'un miroir sphérique concave, un œil dans une position convenable au-devant du miroir apercevra une image renversée de l'objet ; cette image sera plus petite que l'objet, si l'objet est situé au delà du centre ; elle sera plus grande, si l'objet est placé entre le centre et le foyer principal.*

Il est clair que, si l'objet était placé vers le centre, l'image serait à peu près égale à l'objet.

712. Expérience du bouquet renversé. — On place au-devant d'un miroir concave M, et à peu près vers le centre, une caisse

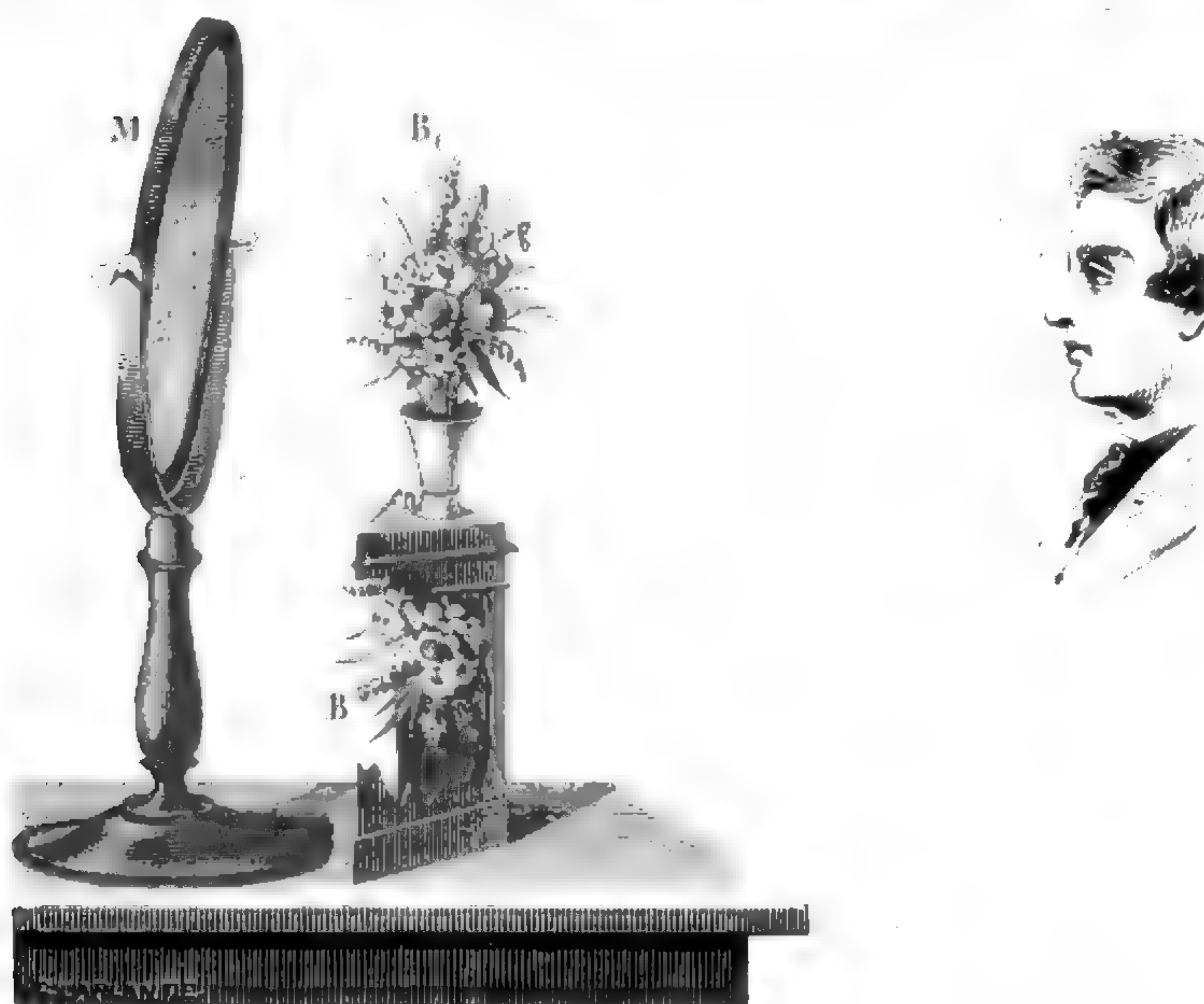


Fig. 640. — Expérience du bouquet renversé.

formée de deux parois opaques entre lesquelles est disposé un bouquet renversé B. A la partie supérieure de la caisse est un vase à fleurs. On peut, en inclinant un peu le miroir, lui donner une position telle, que l'image du bouquet vienne se faire en B_1 juste au-dessus du vase. Comme le bouquet est renversé, son image est droite, et par suite une personne placée à une certaine distance au delà de la caisse voit le bouquet dans le vase. Lorsque les cou-

leurs du bouquet sont un peu vives, l'éclat de l'image est encore assez grand malgré la perte qu'amène la réflexion, et l'illusion est complète.

Les apparences dues aux images réelles produites *au-devant* des miroirs concaves sont assez curieuses ; il est assez singulier de se voir renversé au-devant d'un miroir de grandes dimensions et de voir l'image se rapprocher quand on s'approche soi-même du miroir. Un certain nombre de miroirs de ce genre se trouvaient à l'exposition internationale de 1867 et excitaient vivement la curiosité du public. Si l'on avance vers le miroir l'extrémité d'une canne ou mieux encore une épée nue, la pointe s'avance vers l'observateur; l'illusion peut être assez grande pour le faire reculer. Ajoutons toutefois que ce sont là des expériences du ressort de la physique amusante et d'un intérêt scientifique médiocre.

713. Images obtenues par projection. — La vision directe des images formées par les miroirs sphériques exige que l'œil ait une

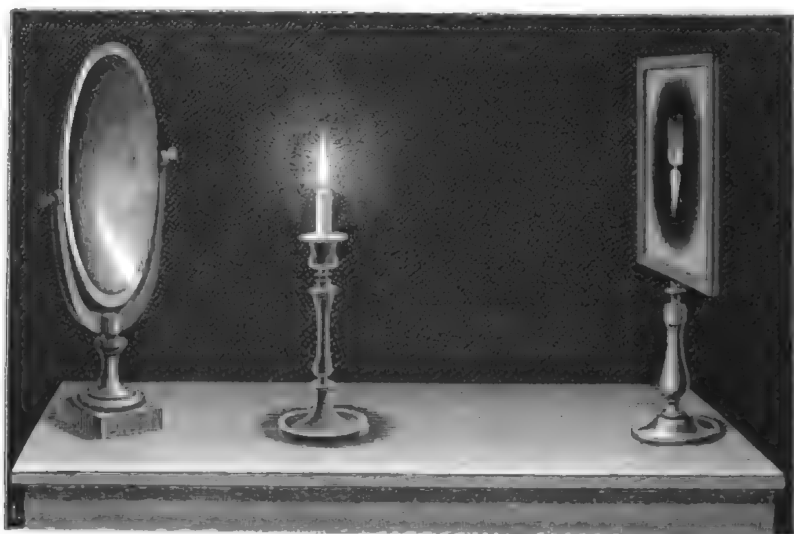


Fig. 641. — Image réelle d'une bougie.

certaine position; il faut évidemment qu'il reçoive les rayons réfléchis, et après qu'ils se sont croisés à leurs foyers conjugués. On peut obtenir les images par une autre méthode qui permet de les rendre visibles pour un très-grand nombre de personnes à la fois.

On opère, par exemple, dans une chambre obscure, et on place une bougie allumée au-devant d'un miroir concave. On dispose un écran dans l'endroit où doit se former l'image, et on voit se dessiner sur l'écran une image renversée de la bougie, présentant avec l'objet lui-même les relations de grandeur et de position qui ont été précédemment indiquées. La figure 641 correspond au cas où, l'objet étant placé entre le centre et le foyer principal, l'image renversée est au delà du centre et plus grande que l'objet.

On peut par ce mode d'expérimentation vérifier très-rigoureusement les conséquences de la formule des foyers, car la position de l'écran qui correspond à la netteté de l'image, à ce qu'on appelle le *point*, est très-précise, du moins quand on n'opère pas à de grandes distances. Pour peu qu'on dérange l'écran de cette position, l'image se trouble immédiatement.

714. Différences qui existent entre les images vues directement et les images par projection. — Caustiques. — Il existe entre les images vues directement et les images par projection une différence fondamentale. Les premières changent un peu suivant la position de l'observateur, tandis que les secondes ont une position invariable et, comme nous venons de le dire, rigoureusement définie. Pour se rendre un compte exact de cette différence, il faut remarquer que la formule des miroirs n'est qu'approchée. Rigoureusement parlant, les rayons réfléchis ne viennent pas concourir en un même point ; ils forment par leurs intersections successives une surface particulière à laquelle les géomètres ont donné le nom de *caustique*, et dans tous les points de laquelle la lumière est plus condensée qu'ailleurs. On peut rendre sensible l'existence de la surface caustique en faisant tomber les rayons solaires sur une lame de métal poli repliée circulairement. On voit se dessiner sur le plan où elle

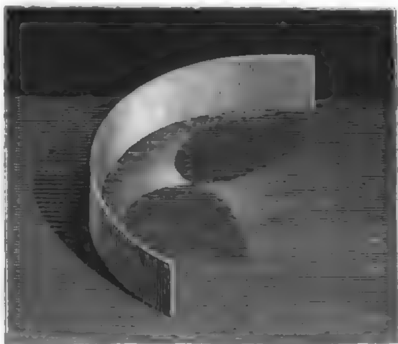


Fig. 642. — Caustique par réflexion.

repose, une courbe présentant une sorte de sommet aigu; c'est l'intersection de la surface caustique par le plan.

La forme de la surface caustique dépend naturellement de celle de la surface réfléchissante. Dans le cas des miroirs sphériques, la surface caustique a la forme d'une sorte d'entonnoir courbe dont l'ouverture est dirigée vers le miroir et le sommet placé précisément au foyer. On peut considérer aussi comme faisant partie de la surface caustique une ligne droite aboutissant au même sommet et dont la direction se confond avec celle même de l'axe. Le foyer conjugué est donc, d'après cette forme de la surface caustique, un point où se trouve une condensation toute spéciale et maxima de lumière. Si donc, opérant avec un objet lumineux, on place un écran dans une position convenable, les points correspondant aux foyers conjugués recevront une quantité de lumière beaucoup plus forte, leur ensemble dessinera une image de l'objet dont la position et la grandeur sont rigoureusement données par la formule des foyers, et qu'on pourra naturellement apercevoir d'un point quelconque de l'espace ambiant.

Si, au contraire, il s'agit de l'image d'un point vue directement, la position de cette image est déterminée par le point de concours des rayons qui pénètrent effectivement dans la pupille; ce point de concours est un point de la surface caustique; mais il n'est pas le même suivant la position de l'œil.

Dans les télescopes, les faisceaux lumineux admis dans l'instrument font toujours un très-petit angle; la surface caustique a donc une étendue relative très-petite; toutefois, même dans ce cas, il peut être utile de tenir compte de l'erreur commise, en se servant de la formule des foyers. Cette erreur constitue ce qu'on appelle l'*aberration de sphéricité*. Il est facile d'en calculer la valeur exacte quand on connaît l'ouverture du miroir.

715. Image virtuelle dans un miroir concave. — Considérons un objet (fig. 643 et 644), placé au-devant d'un miroir concave entre le foyer principal et le miroir. Les rayons lumineux partis du point A (fig. 643) forment après la réflexion un faisceau divergent, dont le point de concours est en *b*. Pour déterminer ce point, il suffit de mener par le point A un rayon parallèle à l'axe principal;

le rayon réfléchi passe par le foyer F et son prolongement va couper l'axe secondaire précisément au point *b*. On détermine de même le point *a*, foyer conjugué du point B. Les points intermédiaires ont leurs foyers situés entre *a* et *b;* l'œil placé en avant du miroir recevra donc des rayons dont les points de concours sont les différents points de *ab*, et verra par conséquent une image qui

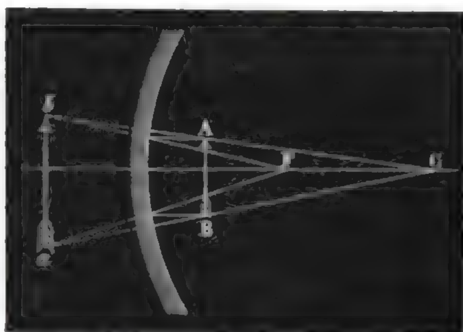


Fig. 643. — Image virtuelle dans un miroir concave.

est droite et évidemment plus grande que l'objet. On calculerait d'ailleurs sa grandeur exacte par la méthode indiquée plus haut. C'est à raison de cet agrandissement de l'image qu'on se sert quelquefois d'un miroir légèrement concave, comme miroir à barbe.

716. Remarques sur les images virtuelles. — Les images virtuelles ne sauraient être observées par projection, puisque les rayons ne se coupent pas réellement; elles ne peuvent qu'être vues directement. Elles sont d'ailleurs nécessairement droites, puisque les rayons ne se sont pas croisés avant d'arriver à l'œil.


Fig. 644. — Image virtuelle dans un miroir concave.

Les images du miroir plan sont de véritables images virtuelles. On peut d'ailleurs les rattacher à la théorie des miroirs sphériques.

Un plan n'est autre chose, en effet, que la surface d'une sphère dont le rayon est infini. La formule des miroirs devient dans ce cas $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 0$, d'où $p = - p'$. Le foyer conjugué est donc placé derrière le miroir et à égale distance sur la perpendiculaire, qui est ici l'axe secondaire. De l'égalité de p et p' résulte l'égalité de grandeur de l'image et de l'objet. La formule est d'ailleurs dans ce cas particulier tout à fait rigoureuse, car le miroir plan ayant théoriquement une grandeur infinie, celui dont on se sert en est toujours une portion infiniment petite.

717. Miroirs convexes. — Il est aisé de voir par une simple construction que dans le cas des miroirs convexes les rayons lumineux, après la réflexion, forment toujours un faisceau divergent ; le foyer principal aussi bien que les foyers conjugués sont donc toujours virtuels.

La formule des foyers est du reste applicable aux miroirs convexes comme aux miroirs concaves, il suffit d'y changer le signe du rayon. Elle devient ainsi

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f},$$

et l'on voit que p' sera toujours négatif, et par conséquent l'image virtuelle. La construction de ces images se fait toujours de la

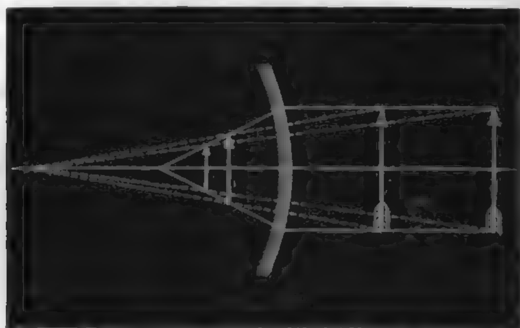


Fig. 645. — Images produites par un miroir convexe.

même façon que pour les miroirs concaves. Soit un objet placé au-devant d'un miroir convexe (fig. 645). Menons par l'extrémité supérieure de l'objet un rayon parallèle à l'axe ; le rayon réfléchi pro-

longé va passer par le foyer principal, et son intersection avec l'axe secondaire détermine le foyer conjugué. On aurait de même le foyer conjugué de l'autre extrémité, et l'on voit par conséquent que l'œil verra une image droite et plus petite que l'objet.

En répétant la même construction pour le même objet plus rapproché du miroir, on voit que l'image devient plus grande tout en étant toujours plus petite que l'objet.

On n'a guère utilisé le miroir convexe que dans un télescope à peu près oublié aujourd'hui, et qui porte le nom de télescope de Cassegrain, bien que la disposition en ait été indiquée par Newton.

Les boules argentées qu'on rencontre si fréquemment dans les jardins sont de véritables miroirs convexes dans lesquels se reflète, si petites qu'elles soient, tout le paysage d'alentour. La courbure étant ici très-forte, la déformation des images est extrêmement marquée, et elles prennent d'une manière très-visible une sorte d'empreinte sphérique.

718. Anamorphoses. — Cette déformation des images est surtout



Fig. 646. — Anamorphoses.

frappante dans les miroirs cylindriques ou coniques que l'on montre dans quelques spectacles forains. Si c'est un miroir cylindrique concave, et dont l'axe soit vertical, les rayons réfléchis suivant les

arêtes suivent la même marche que dans un miroir plan, et ceux qui sont réfléchis suivant une ligne perpendiculaire suivent la loi des miroirs sphériques.

En se plaçant assez près, on verra une image virtuelle, inégalement agrandie dans ses diverses régions, ce qui donne lieu à des effets très-singuliers.

On peut dessiner à l'avance sur des cartons des figures ne représentant en apparence rien de déterminé, et qui, dans un miroir cylindrique ou conique convenablement placé, donnent lieu à des images régulières. Ces jeux d'optique portent le nom d'*anamorphoses* (fig. 646).

719. De quelques applications particulières des miroirs sphériques. — Les miroirs sphériques sont appliqués à l'éclairement de certains objets qu'un observateur placé derrière le miroir peut observer à l'aide d'une ouverture pratiquée dans le miroir lui-même. C'est là le principe d'instruments qui depuis un certain nombre d'années ont rendu de grands services à la physiologie, tels que l'*ophthalmoscope*, le *laryngoscope*, l'*endoscope*, etc. Nous donnerons comme exemple une idée de l'ophthalmoscope. Il se compose d'un miroir concave percé; l'observateur le place au-devant d'un de ses yeux, la face réfléchissante tournée vers l'œil que l'on veut observer, et dirigée de façon que le faisceau de lumière réfléchie pénètre dans la pupille. La rétine est ainsi fortement éclairée, et on peut en voir tous les détails. Souvent, au lieu de regarder l'intérieur de l'œil lui-même, on regarde une image réelle qu'en donne une lentille placée au-devant.

CHAPITRE LIX.

RÉFRACTION.

720. Réfraction. — Lorsqu'un rayon lumineux passe d'un milieu transparent dans un autre, il se produit à la surface de séparation des deux milieux un changement de direction. Le rayon ne poursuit plus sa route en ligne droite, il dévie dans un sens ou dans un autre, suivant les cas. C'est à ce phénomène que l'on donne le nom de *réfraction*.

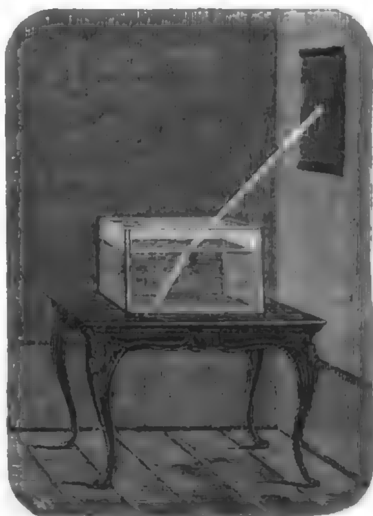


Fig. 647. — Réfraction.

On rend ce phénomène sensible en faisant pénétrer dans une chambre obscure (fig. 647) un faisceau de lumière solaire et le recevant à la surface d'une masse d'eau contenue dans une cuve en verre. On voit qu'au point même de la surface liquide le faisceau change de direction, et on peut suivre sa marche dans le liquide à cause de l'éclairement des particules qui se trouvent sur son trajet.

Une expérience très-simple et très-connue met en évidence le phénomène de la réfraction. Au fond d'un vase à parois opaques (fig. 648) on met une pièce de monnaie *mn*, et on se place de façon qu'une ligne droite partant de *m* et rasant le bord A du vase atteigne l'œil. Cette

position est la limite de celles qui permettent de voir la pièce. Si alors on verse de l'eau dans le vase jusqu'en PP' en prenant les précautions nécessaires pour que la pièce de monnaie ne change pas de position, l'œil l'aperçoit très-distinctement en *m'*. Il faut donc en conclure qu'un faisceau de rayons lumineux ayant pour sommet géométrique le point *m'* pénètre dans l'œil. Mais ces rayons sont effectivement partis du point *m*, ils ont donc nécessairement éprouvé aux points I et I' une déviation qui les a fait aboutir à l'œil. Celui-ci, rapportant l'objet au point de concours des rayons qu'il reçoit, le voit en *m'* plus élevé qu'il ne l'est réellement.

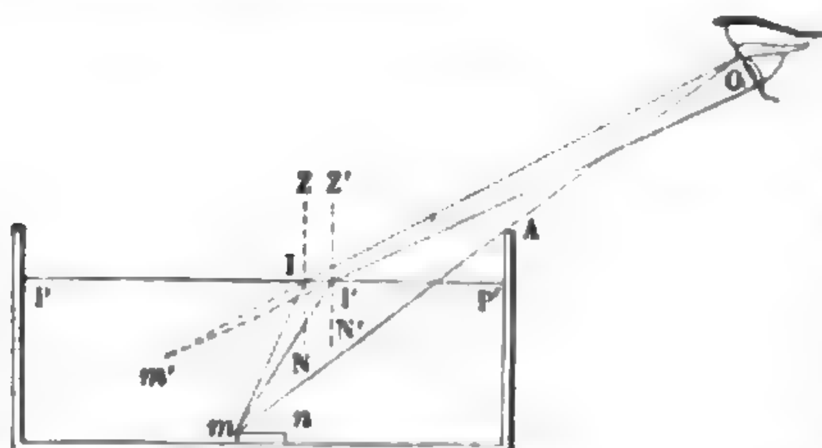
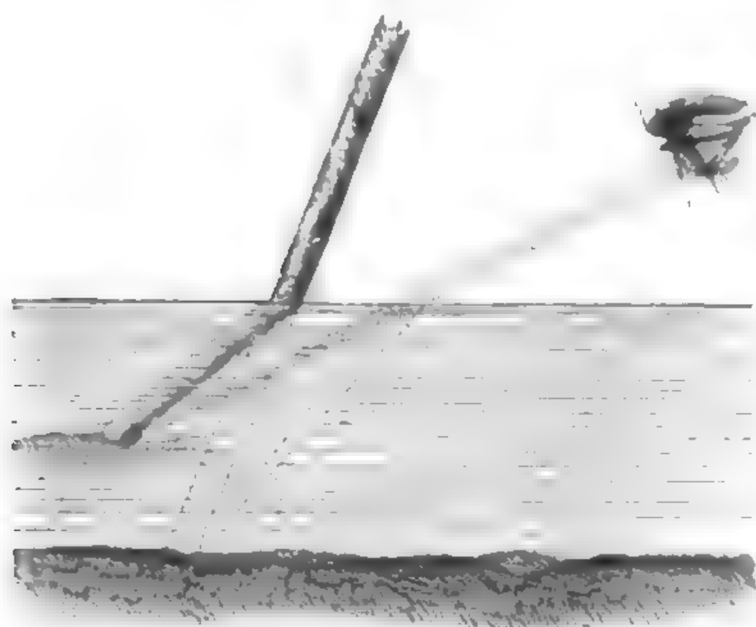


Fig. 648. — Expérience de la pièce de monnaie.

C'est la même cause qui explique l'élévation apparente du fond d'une rivière ou d'un lac limpide. C'est aussi la réfraction qui produit l'apparence, si anciennement observée, d'un bâton que l'on plonge dans l'eau (fig. 649); il paraît brisé à la surface du liquide, et les deux portions, extérieure et intérieure, ne sont point sur le prolongement l'une de l'autre. En effet, l'extrémité inférieure paraît soulevée comme la pièce de monnaie de l'expérience précédente, le point qui se trouve à la surface n'éprouve aucun déplacement, par conséquent la portion plongée paraît avoir pour l'œil une direction différente de sa direction réelle.


Fig. 649. — Apparence que présente un bâton plongé dans l'eau.

721. Milieux plus ou moins réfringents. — Dans l'expérience de la pièce de monnaie, les rayons lumineux en se réfractant aux points I et I' s'écartent des normales ZN, Z'N'. Dans la première expérience que nous avons décrite, le faisceau lumineux, en

passant de l'air dans l'eau, se rapproche au contraire de la normale. Quand un rayon en passant d'un milieu dans un autre se rapproche de la normale, on dit que le second milieu est *plus réfringent* que le premier ; il est *moins réfringent* lorsque le rayon lumineux s'éloigne de la normale. Bien que cela ne soit pas tout à fait sans exception, on peut dire que la réfringence et la densité sont corrélatives, de telle sorte qu'en général un milieu plus dense qu'un autre est en même temps plus réfringent, et réciproquement.

722. Lois de la réfraction. — La loi de la réfraction de la lumière n'a été découverte qu'à une époque relativement récente. Snellius, savant hollandais, et Descartes, en ont donné chacun, et à la suite de travaux indépendants les uns des autres, un énoncé particulier. Toutefois, la formule plus simple de Descartes étant restée dans la science, on donne le plus souvent aux lois de la réfraction le nom de *lois de Descartes*. Nous allons indiquer en quoi elles consistent.

Considérons un rayon lumineux RI (fig. 650) tombant en I à la surface de séparation de deux milieux; l'angle que fait ce rayon avec la normale au point I se nomme l'angle d'incidence, et son plan est le plan même de l'incidence. D'après cela, la première lo de la réfraction consiste en ce que

La réfraction se fait dans le plan de l'incidence.

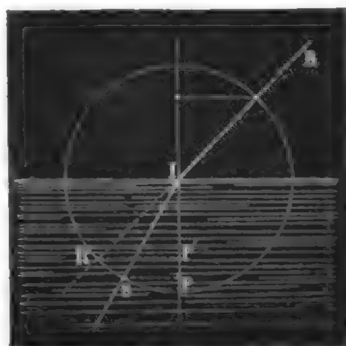


Fig. 650. — Loi de la réfraction.

Le rayon lumineux réfracté IS, dans le cas de la figure, se rapproche de la normale, ce qui veut dire que le second milieu est plus réfringent que le premier, mais il ne sort pas du plan d'incidence.

Quant à l'angle de réfraction SIP, sa valeur n'est pas liée à celle de l'angle d'incidence par une relation facile à saisir, et c'est ce qui explique comment, malgré des recherches très-nombreuses, la loi de la réfraction est restée si longtemps inconnue.

Mais, au lieu de comparer directement les angles d'incidence et de réfraction, comparons leurs lignes trigonométriques. Décrivons, par exemple, du point I comme centre une circonférence de cercle qui coupe le rayon réfracté en S, et le prolongement du rayon incident en R', et abaissons les perpendiculaires R'P' et SP sur la normale. On reconnait que, quel que soit l'angle d'incidence, le rapport de ces deux perpendiculaires est constant. Ces perpendiculaires sont précisément les sinus des angles d'incidence et de réfraction. On peut donc énoncer comme il suit la seconde loi de la réfraction :

Le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction sont dans un rapport constant.

723. Vérification de la loi de Descartes. — On peut vérifier les lois de la réfraction avec l'appareil que représente la figure 651, appareil fort semblable d'ailleurs à celui dont se servait Descartes lui-même. Il se compose d'un cercle gradué vertical sur lequel est disposé un vase ayant la forme d'un demi-cylindre contenant de l'eau ou tout autre liquide transparent. La surface libre du liquide passe exactement par le centre du limbe. On fait arriver un rayon solaire sur le petit miroir I, et on le dirige en inclinant convenablement le miroir sur le centre O, en lui faisant traverser un petit tube diaphragmé. L'alidade O*a* munie d'un vernier fait connaître la valeur exacte de l'angle d'incidence. Le rayon lumineux se réfracte, et on assigne sa posi-

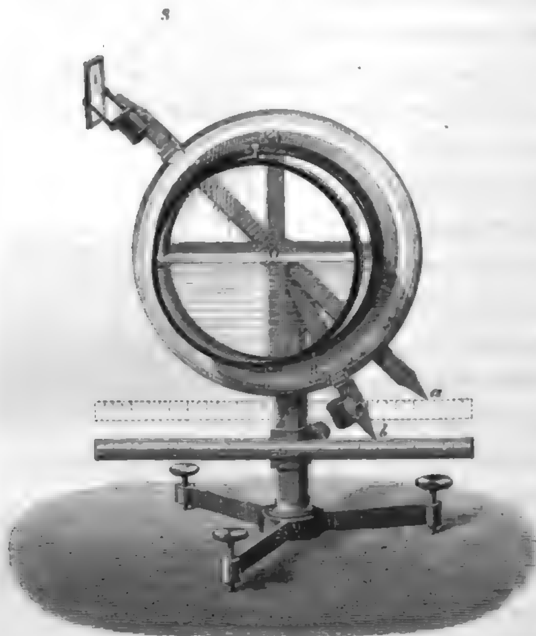


Fig. 651. — Appareil pour vérifier les lois de la réfraction

tion en faisant mouvoir une seconde alidade OR jusqu'à ce que le rayon lumineux sortant du vase vienne tomber exactement sur le petit diaphragme du tube qui la termine. Le rayon sortant du vase dans une direction perpendiculaire n'éprouve aucune réfraction nouvelle, et par conséquent la position de l'alidade définit exactement la direction du rayon réfracté. On peut lire sur le limbe la valeur de l'angle d'incidence et de l'angle de réfraction : on prend le rapport de leurs sinus et on trouve qu'en faisant varier l'angle d'incidence, ce rapport reste constant. On peut aussi mesurer directement les sinus à l'aide des extrémités *a* et *b* des alidades et d'une règle divisée horizontale qui peut se mouvoir parallèlement à elle-même.

Remarquons qu'il serait très-facile avec cet appareil de faire arriver le rayon lumineux par la partie inférieure, et que le rapport des sinus resterait le même, ce qui veut dire qu'en rebroussant chemin un rayon lumineux repasse exactement par les mêmes points. Ce principe assez évident *à priori*, et connu sous le nom de *principe du retour inverse*, est d'un usage continuel en optique.

724. Indices de réfraction. — La valeur numérique du rapport constant entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction varie avec la nature de chacun des milieux ; on l'appelle l'*indice relatif de réfraction*. Si on suppose que le rayon lumineux passe du vide dans une substance considérée, le rapport dont il s'agit est dans ce cas toujours plus grand que l'unité et ne dépend que de la nature de la substance. C'est par conséquent un nombre spécifique, servant à définir la substance considérée, et constituant un caractère physique très-important. On le nomme l'*indice de réfraction*. L'indice de réfraction de l'air étant très-petit par rapport à celui de la plupart des solides et des liquides, dans un grand nombre d'applications on en néglige la valeur, et on suppose que l'indice est le même, soit que le rayon passe de l'air dans une substance déterminée ou du vide dans la même substance. Rigoureusement il n'en est pas ainsi, et lorsque l'on connaît l'indice relatif d'une substance par rapport à l'air, il faut multiplier par l'indice de l'air pour avoir l'indice absolu. Le tableau suivant renferme l'indice de réfraction de quelques substances.

INDICES DE RÉFRACTION.

Diamant	2,755	Éther	1,358
Soufre fondu	2,148	Humeur aqueuse de l'œil	1,337
Boracite	1,701	Humeur vitrée	1,339
Sulfure de carbone	1,678	Enveloppe extérieure du cristallin	1,337
Flint-glass	1,605		
Glace Saint-Gobain	1,543	Enveloppe moyenne	1,379
Crown-glass	1,534	Enveloppe centrale	1,399
Alcool	1,374	Eau	1,336
Albumine	1,360	Air	1,00029

725. Angle limite. — On voit, d'après la loi de Descartes, que lorsqu'un rayon lumineux tend à pénétrer dans un milieu plus dense, à tout angle d'incidence correspond toujours un

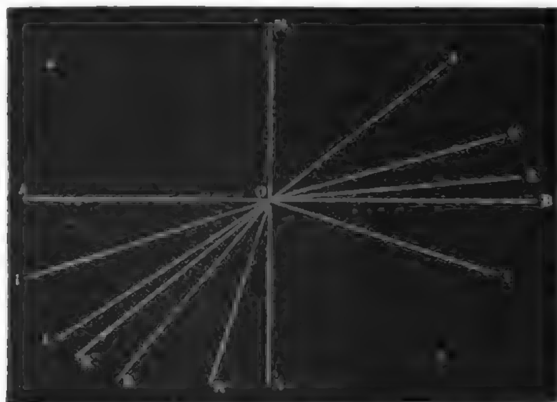


Fig. 652. — Angle limite.

angle de réfraction déterminé. Il n'en est pas de même lorsque le rayon tend à passer d'un milieu plus dense dans un milieu moins dense. Considérons en effet (fig. 652) les rayons incidents SO, S′O, S″O sur un milieu plus dense, les rayons réfractés sont OR, OR′, OR″; l'incidence de 90° correspond au rayon réfracté OL. Réciproquement, si les rayons OR, OR′, OR″ viennent du milieu plus dense, ils sortiront suivant OS, OS′, OS″; au rayon incident OL correspond le rayon émergent OB, qui fait avec la normale un angle de 90°. L'angle qui correspond à une émergence de 90° se déduit facilement

de la loi de Descartes, car en désignant par n l'indice relatif du milieu le plus dense, on doit avoir $\frac{\sin 90^\circ}{\sin x} = n$, d'où $\sin x = \frac{1}{n}$. Cet angle porte le nom d'angle limite. Dans le passage de l'eau dans l'air, cet angle a pour valeur 48° 35′; il est de 41° pour le passage du verre dans l'air.

Si un rayon tel que IO tend à sortir du milieu le plus réfringent sous un angle plus grand que l'angle limite, la loi de Des-



Fig. 653. — Réflexion totale.

cartes n'est plus applicable, mais l'expérience montre que le rayon est réfléchi dans l'intérieur suivant OI′. Ce phénomène porte le

nom de *réflexion totale,* non pas qu'il n'y ait aucune perte de lumière dans la réflexion, mais cela veut dire qu'aucun rayon ne sort à l'extérieur. On peut donc énoncer la proposition suivante : *Lorsqu'un rayon lumineux tend à sortir d'un milieu plus réfringent dans un milieu moins réfringent sous un angle plus grand que l'angle limite, le rayon est totalement réfléchi à l'intérieur.*

Le phénomène de la réflexion totale s'observe dans des circonstances très-connues. Ainsi, par exemple, si l'on plonge une cuiller dans un verre contenant de l'eau (fig. 653), et qu'on l'élève au-dessus de l'œil, on voit la surface du liquide brillante comme un métal poli à sa partie inférieure, et une portion de la cuiller y forme son image comme dans un miroir.

Dans les aquariums si répandus aujourd'hui, la réflexion totale ajoute beaucoup à l'aspect intéressant de l'appareil. Dans la surface supérieure du liquide se montrent en effet les images des poissons, et des différents objets que l'aquarium renferme. Lorsque celui-ci est convenablement placé par rapport à l'œil de l'observateur, que les mousses, les plantes marines, les coquillages ont été disposés avec une certaine symétrie, l'ensemble de ces divers objets et de leur image dans la surface supérieure du liquide peut produire un effet très-agréable.

726. Mirage. — Le mirage est aussi un effet de la réflexion totale. Ce phénomène singulier s'observe fréquemment dans les plaines sablonneuses échauffées par le soleil. L'observateur voit à l'horizon comme une immense nappe d'eau (fig. 654), dans le sein de laquelle se reflètent comme dans un miroir le ciel, les nuages, les arbres, etc. Le mirage est commun en Égypte, et l'armée française, à l'époque de la célèbre expédition de 1798, en éprouva souvent de cruelles déceptions. Monge, qui faisait partie de l'expédition, a donné sur place une explication qui est devenue classique.

Par l'effet des rayons solaires, lorsque l'atmosphère est calme, les couches d'air qui sont en contact avec le sol s'échauffent beaucoup, et il peut arriver que dans une petite épaisseur leur densité soit décroissante à mesure qu'elles s'approchent du sol lui-même. C'est un fait purement accidentel, qui dépend de diverses circon-



Fig. 654. — Mirage.

stances propres au lieu où on l'observe, qui ne s'étend que très-peu et ne porte aucune atteinte, par conséquent, à la loi générale du décroissement de la densité à mesure qu'on s'élève. Dans le cas où ces conditions physiques particulières se rencontrent, voici ce qui peut arriver : un rayon lumineux venu du point M (fig. 655) va se réfracter successivement en *a*, *d* en s'éloignant de la normale; à un certain moment sa direction coïncidera avec celle de la couche d'air A,

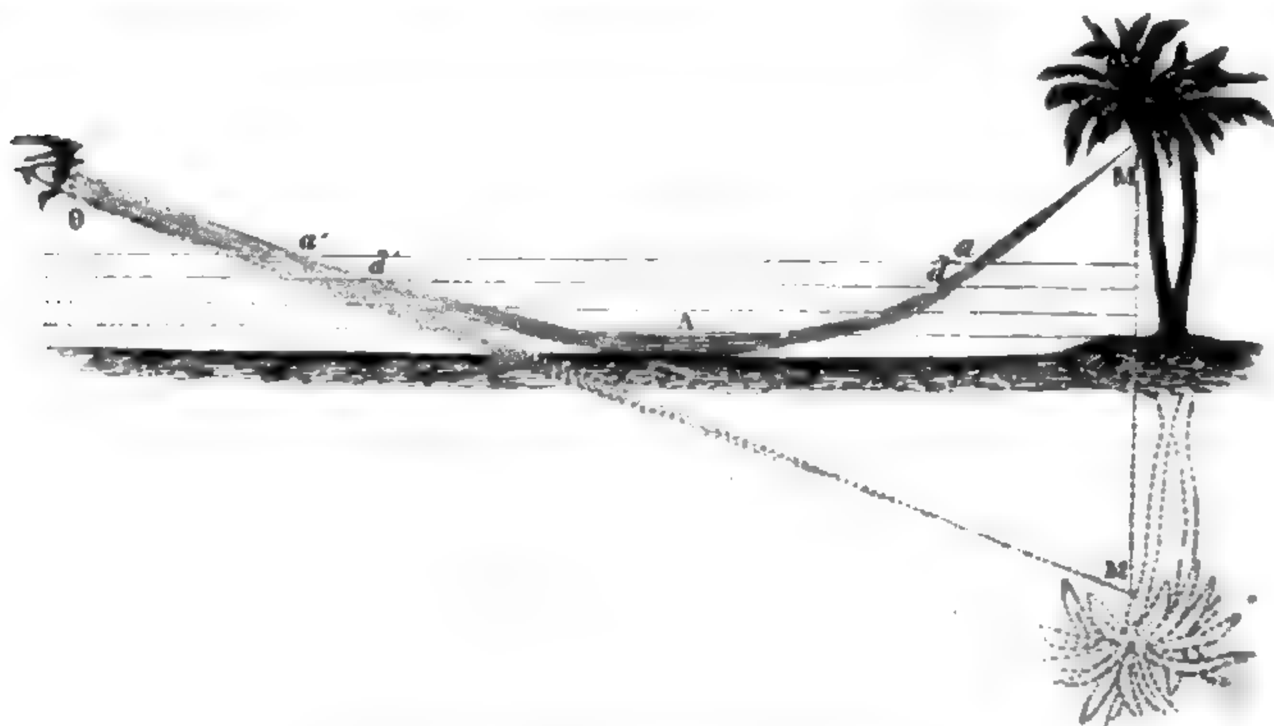


Fig. 655. — Théorie du mirage.

et cette dernière fera l'office d'un miroir; le rayon suivra donc en sens inverse une route pareille A *a' d'* à celle qu'il a déjà suivie et atteindra l'œil de l'observateur, qui verra en M' une image du point M, en même temps qu'il verra l'objet directement. C'est donc la couche d'air qui, à un certain moment, devient miroir et joue par conséquent le même rôle qu'une nappe d'eau réfléchissante.

On peut donner une certaine consistance à cette théorie par l'expérience suivante : On se sert d'une caisse rectangulaire en tôle, dont on enlève deux parois opposées; on chauffe le fond de la caisse en dehors avec du charbon, et on se place pour observer du côté où les parois ont été enlevées. Ordinairement on n'observe rien de particulier, si ce n'est un certain tremblement dans le champ de la vision produit par le mouvement des couches d'air dilatées. Mais quelquefois aussi un certain calme, dû à des conditions difficiles à analyser, s'établit; l'une des couches d'air se transforme, dans ce cas, en miroir, et on voit dans son intérieur l'image des objets placés au delà de la caisse.

Le mirage précédent est le mirage inférieur. On l'observe très-rarement dans nos pays. Le mirage latéral est, au contraire, assez commun; il se produit au voisinage d'un mur exposé au midi et fortement échauffé par le soleil.

Dans ce cas, les objets placés à une certaine distance donnent lieu à des rayons qui viennent se réfléchir sur l'une des couches d'air voisines du mur. L'observateur voit, par conséquent, une image de l'objet; si celui-ci est mobile, on voit l'image et l'objet se rapprocher ou s'éloigner l'un de l'autre, se pénétrer quelquefois en partie, ce qui donne lieu à un spectacle assez singulier.

Le mirage supérieur est très-fréquent en mer quand l'air est calme; il est produit par la réflexion des rayons venus d'un navire sur des couches d'air supérieures; on voit alors une image renversée du navire, située au-dessus de lui et présentant en général une sorte de confusion ou de pénétration à la région de contact.

727. Chambre claire. — La chambre claire, instrument fort employé soit pour le dessin, soit pour la mesure du grossissement dans les instruments d'optique, est fondée aussi sur le phénomène de la réflexion totale. On peut lui donner des dispositions assez

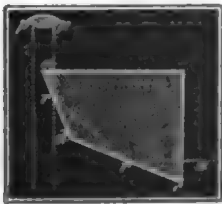


Fig. 656. — Chambre claire.



Fig. 657. — Chambre claire.

diverses; la figure 656 représente celle qui a été proposée par Wollaston. L'organe essentiel est un prisme à quatre faces, dont deux sont perpendiculaires l'une sur l'autre, tandis que les faces opposées se coupent sous un angle de 135°; les deux autres angles sont sensiblement égaux à 67°,5.

L'une des faces perpendiculaires est tournée vers les objets extérieurs; un rayon x pénétrant normalement par cette face tombe

sur les deux faces inclinées à 135°, sous un angle de 67° environ, angle très-supérieur à l'angle limite; il se réfléchit donc normalement sur la seconde face perpendiculaire et peut être reçu par l'œil. On peut placer l'arête *a* du prisme de façon que l'une des moitiés de la pupille *pp* reçoive le faisceau *x* venant des objets extérieurs et l'autre moitié un autre faisceau provenant d'une feuille de papier blanc placée au-dessous. On pourra donc voir à la fois, projetées sur la feuille de papier, et l'image virtuelle des objets extérieurs et la pointe d'un crayon avec laquelle on pourra les dessiner. Le prisme est porté horizontalement sur un pied (fig. 657) et peut tourner librement autour de son axe. La face supérieure est recouverte d'un écran percé d'une ouverture de quelques millimètres de largeur, et placée dans le voisinage de l'arête *a* de manière à dépasser le prisme d'une quantité variable.

L'œil ayant besoin de s'approprier aux diverses distances des objets qu'il aperçoit, la simultanéité des deux images, très-inégalement distantes en réalité, produit rapidement un sentiment de fatigue très-prononcé. On atténue beaucoup cet inconvénient en plaçant sur le trajet des rayons et en avant du prisme un verre concave, qui rapproche, comme nous l'expliquerons dans le chapitre suivant, l'image virtuelle des objets extérieurs. On peut aussi tailler la face DD de manière à lui donner la courbure nécessaire pour produire le même effet.

728. Réfraction à travers une lame à faces parallèles. — Lorsqu'un faisceau de rayons lumineux tombe normalement sur une lame transparente à faces parallèles, il n'y a pas de réfraction, et par suite pas de déviation apparente du point d'où provient le faisceau. Il n'en est pas de même quand le rayon arrive sur la lame sous une incidence oblique. Soit, par exemple (fig. 658), un rayon incident SI, tombant sur la lame sous un angle d'incidence SIN; il se réfracte et prend la direction IR. Au point R l'angle d'incidence pour sortir dans l'air étant le même que l'angle de réfraction en I, il résulte du principe indiqué plus haut (722) que l'angle d'émergence S'RN' est égal à SIN, c'est-à-dire que le rayon émergent RS' est parallèle au rayon incident SI, mais il n'est point sur son prolongement.

Soit d'après cela (fig. 659) un point lumineux S envoyant sur une lame à faces parallèles un faisceau de rayons lumineux ; ce faisceau traverse la lame, et les rayons émergents sont parallèles aux rayons

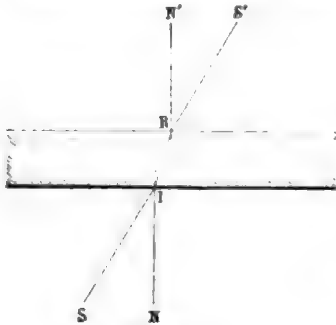
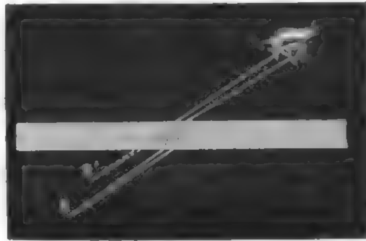


Fig. 658.


Fig. 659. — Vision à travers une lame à faces parallèles.

incidents ; mais comme ils ont subi un déplacement, leur point de concours S' se trouve changé, et c'est en ce point que l'œil voit le point S. Ce déplacement dépend à la fois de l'indice de réfraction de la substance et de l'épaisseur de la lame. Toutes choses égales d'ailleurs, il dépend seulement de l'indice et peut fournir un moyen très-simple de le déterminer[1].

729. Images multiples produites par les lames à faces parallèles. — Imaginons un point lumineux S (fig. 660) placé au-devant d'une lame transparente à faces parallèles, les rayons émanés de ce point subissent sur la face supérieure une réflexion qui donne lieu à l'image S' ; ils pénètrent dans la lame, se réfléchissent sur la face inférieure et donnent lieu à une seconde image S° ; ils viennent se réfléchir ensuite sur la face supérieure, et de là une


Fig. 660. — Images dues aux réflexions multiples dans une glace à faces parallèles.

1. C'est sur ce principe qu'est fondé le réfractomètre de M. Pichot.

seconde fois sur la face inférieure, ce qui donne lieu à l'image S_1, et ainsi de suite, de sorte qu'un œil placé à une certaine distance du point S, de façon à pouvoir écarter suffisamment les images, en apercevra une série dont l'éclat diminue d'ailleurs rapidement à cause de la perte due aux réflexions. C'est pour cette raison que, si l'on place une bougie devant une glace ordinaire (fig. 661), et qu'on se place un peu obliquement, on aperçoit une première image un peu terne due à la réflexion sur la surface du verre ; une deuxième beaucoup plus brillante due à la réflexion sur le tain, et une série dont l'éclat va en décroissant, provenant des réflexions successives à la surface du tain.



Fig. 661. — Image d'une bougie vue dans une glace ordinaire.

Si le point lumineux observé est à une distance infiniment grande, si c'est une étoile, par exemple, toutes les images doivent se confondre en une seule, dont la position est absolument invariable, quel que soit le faisceau particulier qui arrive à l'œil, si toutefois la lame a ses faces bien rigoureusement parallèles. Cette expérience donne précisément le moyen de constater s'il en est ainsi. On pose la lame sur trois pointes ; on vise l'image avec une lunette munie d'un réticule, et on s'assure que pendant le mouvement de la plaque l'image reste absolument immobile.

730. Réfraction à travers un prisme. — En optique on désigne sous le nom de prisme une masse transparente (fig. 662), ordinairement en verre, formant un prisme droit dont la base est un triangle équilatéral ou isocèle. Si l'on suppose une section faite par un plan perpendiculaire aux arêtes, on obtient la *section principale* du prisme, qui n'est autre chose que le triangle de base.

Le prisme est ordinairement monté sur un pied (fig. 663) et fixé sur une pièce en métal, sur laquelle il peut tourner autour de son axe. La pièce est elle-même mobile autour d'un axe vertical et elle

est d'ailleurs munie d'un genou, de telle façon que le prisme peut être placé d'une manière tout à fait quelconque dans l'espace.

Supposons actuellement (fig. 664) un rayon lumineux SI situé



Fig. 662. — Prisme.



Fig. 663. — Prisme monté sur un pied.

dans le plan de la section principale du prisme; au point d'incidence I le rayon passant dans un milieu plus dense s'approche de la normale IN et prend la direction IE. Au point E le rayon passant dans un milieu moins dense s'éloigne de la normale EN' et prend la direction EB. L'effet des deux réfractions est donc d'abaisser le rayon vers la base du prisme ou de l'éloigner du sommet, c'est-à-dire de l'angle de réfringence.

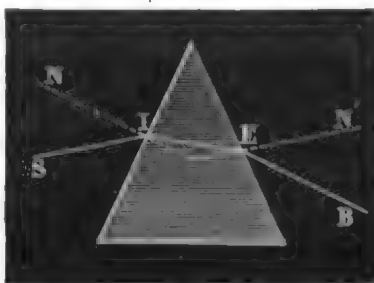


Fig. 664. — Réfraction à travers un prisme.

On peut vérifier directement ce résultat en introduisant un faisceau de lumière solaire dans une chambre obscure et le faisant tomber sur le prisme, tout près de son sommet, de façon qu'une portion seulement du faisceau soit interceptée. On peut suivre ainsi

directement la marche du faisceau direct et de celui qui a traversé le prisme, et constater la déviation de ce dernier du côté de la base.

Puisque les rayons sont abaissés vers la base du prisme, il est évident que l'œil qui les reçoit doit voir l'objet d'où ils proviennent dans une position plus élevée que celle qu'il occupe réellement. C'est ce qu'il est facile de constater par l'expérience. Il suffit d'in-

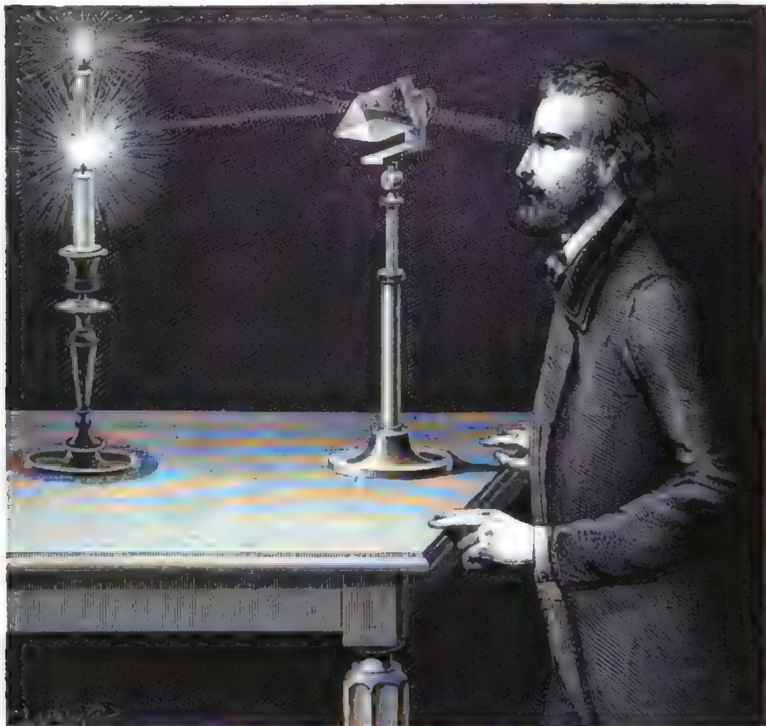


Fig. 665. — Vision à travers un prisme.

terposer entre l'œil et une bougie allumée (fig. 665) un prisme dont l'arête de réfringence soit horizontale; on voit ainsi l'image de la bougie très-sensiblement élevée, et d'autant plus d'ailleurs que l'angle de réfringence du prisme est plus considérable.

731. Relations entre les divers éléments de la réfraction produite par un prisme. — Déviation minima. — Considérons un rayon incident SI (fig. 666) tombant dans le plan de la section prin-

cipale et sous un angle d'incidence égal à i. Si l'on désigne par r l'angle de réfraction et par n l'indice, on aura la relation

$$\sin i = n \sin r; \qquad (1)$$

on aura de même, en désignant par i l'angle d'incidence à la sortie et par r' l'angle d'émergence :

$$\sin i' = n \sin r'. \qquad (2)$$

Si on prolonge le rayon émergent jusqu'à sa rencontre avec le rayon incident, on obtient l'angle sous lequel ils se coupent et qui est précisément la déviation D produite par le prisme. On a évidemment après la figure

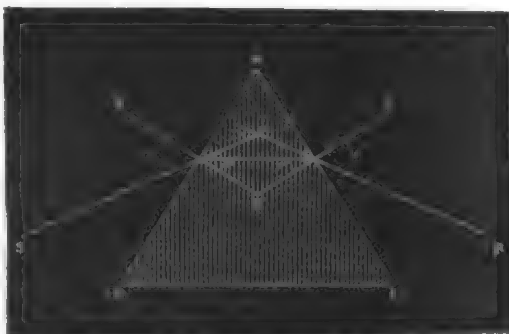


Fig. 666. — Relations entre les divers éléments de la réfraction produite par un prisme.

$$D = i - r + i' - r'.$$

D'autre part, dans le quadrilatère AIMI', deux angles en I et I' sont droits, les deux autres sont donc supplémentaires ; mais l'angle en M est le supplément de r et r' ; donc

$$A = r + r'. \qquad (3)$$

et par conséquent

$$D = i + i' - A. \qquad (4)$$

Les quatre équations (1), (2), (3), (4) permettent d'étudier rigoureusement toutes les circonstances de la réfraction dans le plan de la section principale du prisme. Nous ne nous arrêterons pas à cette analyse, qui est un peu en dehors de l'esprit général de ce traité, mais nous examinerons en particulier une circonstance fort importante. Lorsque l'angle d'incidence i a une valeur quelconque, l'angle d'émergence i' est généralement différent. Il est évident que si l'angle d'incidence était i', l'angle d'émergence serait i et la déviation aurait la même valeur. Il y a donc deux angles d'incidence i et i' qui produisent la même déviation. Cela posé, diminuons un peu l'angle i, l'angle i' diminuera aussi, et d'après l'équation (4)

il en sera de même de la déviation. A mesure donc que les deux angles i et i' se rapprochent, la déviation commune qu'ils produisent diminue aussi : elle aura donc la plus petite valeur possible quand ces angles seront égaux, c'est-à-dire quand l'angle d'incidence sera égal à l'angle d'émergence : c'est ce que l'on appelle la *déviation minima*. Il est facile de placer un prisme dans la position qui lui correspond : il suffit de le faire tourner autour de son axe et de suivre le déplacement de l'image ; il y a une position où elle paraît stationnaire pendant quelques instants malgré le mouvement du prisme : c'est précisément celle qui correspond au minimum de déviation.

Dans ce cas, les équations ci-dessus se simplifient notablement ; en effet, i étant égal à i' et r à r', les équations (3) et (4) donnent $r = \frac{A}{2}$ et $I = \frac{D + A}{2}$, d'où l'on déduit, à l'aide de l'équation (1) :

$$n = \frac{\sin \frac{D + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}},$$

relation importante qui permet de déterminer l'indice de réfraction, à l'aide seulement de la déviation et de l'angle de réfringence du prisme. C'est le principe de la méthode la plus en usage pour la détermination des indices.

732. Double réfraction. — Dans tout ce qui précède, nous n'avons parlé que d'un seul rayon réfracté ; il n'y en a qu'un en effet lorsqu'il s'agit des liquides, des solides transparents non cristallisés, ou de ceux qui cristallisent dans le système régulier, dont les formes types sont le cube et l'octaèdre régulier. Dans toutes les autres substances cristallisées, à un rayon incident unique correspondent deux rayons réfractés. Ce phénomène a été découvert en 1670 par Érasme Bartholin dans le spath d'Islande ; il fut étudié avec beaucoup de soin par Huyghens, qui détermina avec une précision extrême la manière dont se fait la double réfraction dans cette substance.

733. Particularités de la double réfraction dans le spath. — Le spath d'Islande est du carbonate de chaux cristallisé; son nom lui

vient de ce qu'on en trouve en Islande des gisements très-importants. La forme sous laquelle on le rencontre le plus fréquemment est celle d'un solide (fig. 667) dont les faces sont parallèles à celles d'un rhomboèdre. On désigne ainsi un parallélipipède oblique dont toutes les faces sont des losanges.

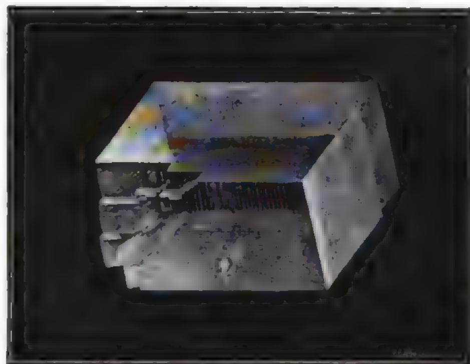


Fig. 667. — Spath d'Islande.

Pour constater la double réfraction du spath, il suffit de poser un échantillon de la substance sur les caractères d'un livre (fig. 668), chacun d'eux paraît doublé ; en outre, la teinte noire des caractères ne se retrouve pas dans les deux images ; celles-ci sont plutôt grises, et ce



Fig. 668. — Double réfraction dans le spath.

n'est que dans les endroits où les images se superposent, que le ton noir est le même que celui des lettres, ou encore celui qu'on aurait observé à travers une substance monoréfringente.

Pour comprendre les caractères physiques de la réfraction dans le spath, il faut analyser un peu sa forme cristalline.

Si l'on considère le solide rhomboédrique idéal (fig. 669) auquel se rapporte la forme du spath, on appelle *axe du cristal* la droite qui joint les sommets des angles trièdres obtus. On ne rencontre jamais, ou presque jamais du moins, des solides régulièrement formés comme celui de la figure ; mais les angles des faces n'étant jamais altérés

quel que soit leur développement relatif, il est toujours facile d'assigner la direction de l'axe malgré l'irrégularité apparente du cristal.

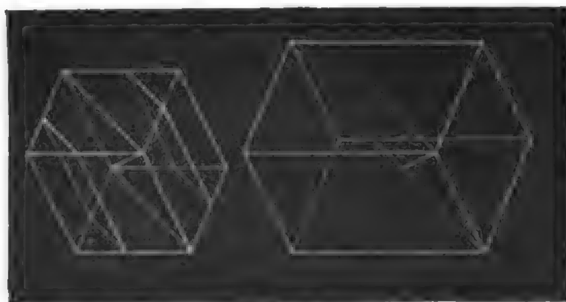


Fig. 669. — Axe cristallographique du spath.

Pour étudier les lois de la réfraction, on façonne la substance en prisme, dont les arêtes ont un rapport de situation défini avec l'axe du cristal. On est ainsi arrivé aux résultats suivants :

1° Des deux rayons refractés que fournit un rayon incident sur le spath, il y en a un qui suit complétement la loi de Descartes, c'est le *rayon ordinaire;* l'autre qui ne la suit pas, c'est le *rayon extraordinaire.* Ce dernier n'est pas généralement dans le plan de l'incidence.

2° Quand le plan d'incidence renferme l'axe du cristal, le rayon extraordinaire reste dans le plan de l'incidence, mais l'angle de réfraction ne suit pas la loi de Descartes.

3° Quand le plan d'incidence est perpendiculaire à l'axe du cristal, les deux rayons suivent tous les deux la loi de Descartes, mais avec des indices différents. On appelle indice ordinaire, l'indice du rayon ordinaire; indice extraordinaire, l'indice du rayon extraordinaire.

734. Cristaux à un et deux axes. — Les faits précédents s'appliquent à tous les cristaux qui ont un axe cristallographique; c'est ce qui a lieu pour toutes les substances qui appartiennent au système du *rhomboèdre,* ou du *prisme à base carrée,* telles que le quartz, le rutile (oxyde de titane), l'idocrase (silicate d'alumine et de chaux), etc. Dans tous les autres systèmes, il y a toujours deux rayons, mais aucun des deux ne suit la loi de Descartes ; ils sont, si l'on peut parler ainsi, tous les deux extraordinaires. Les substances telles que le spath d'Islande, le quartz sont très-correctement appelées *cristaux à un axe;* les autres sont désignées sous le nom moins propre de *cristaux à deux axes.*

CHAPITRE LX.

LENTILLES.

735. Lentilles. — On désigne sous le nom de *lentilles* des masses de verre comprises entre deux surfaces sphériques. On en distingue de plusieurs sortes se rapportant à deux types.

1° Les *lentilles convergentes*, qui présentent l'une des trois formes représentées dans la figure 670. La première est appelée *lentille biconvexe* ; elle est terminée par deux surfaces sphériques dont les



Fig. 670. — Lentilles convergentes.

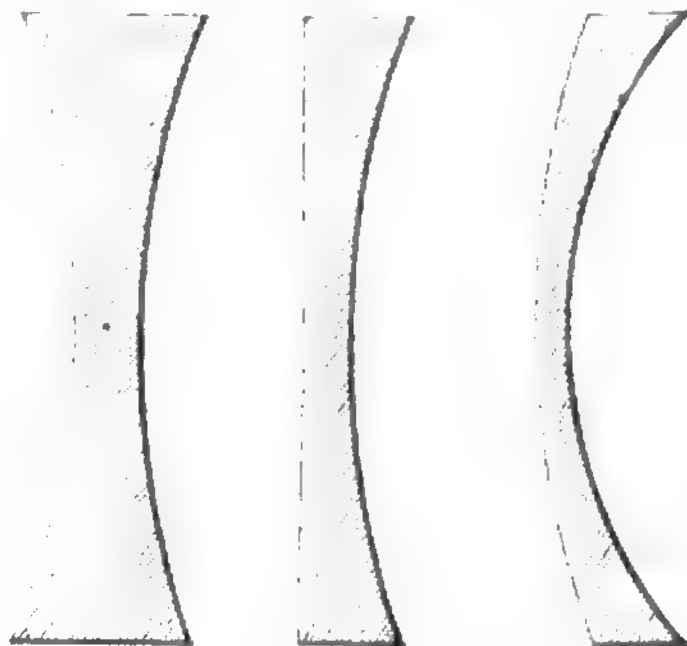


Fig. 671. — Lentilles divergentes.

courbures sont dirigées en sens contraires. La deuxième, appelée *plan-convexe*, est comprise entre une surface plane et une surface sphérique. La troisième, qui porte le nom de *ménisque convergent*, est limitée par deux surfaces sphériques ayant leurs courbures dans le même sens.

Ces trois sortes de lentilles sont toutes plus épaisses au centre

que vers les bords; elles portent le nom commun de lentilles convergentes, parce que deux rayons qui tombent sur elles éprouvent, par la réfraction à travers leur substance, un accroissement de convergence ; ordinairement même, de divergents qu'ils étaient à l'entrée, ils deviennent convergents à la sortie.

2° Les *lentilles divergentes* (fig. 671) produisent un effet inverse : elles augmentent la divergence des rayons qui tombent sur elles. Elles sont toujours plus épaisses au bord qu'au centre. Elles présentent aussi trois formes distinctes. La première, limitée par deux surfaces sphériques concaves vers l'extérieur, s'appelle *lentille biconcave*. La seconde est comprise entre une surface plane et une surface sphérique concave vers l'extérieur, on l'appelle lentille *plan-concave*. La troisième, limitée par deux surfaces sphériques, l'une concave, l'autre convexe, porte le nom de *ménisque divergent*.

Les lentilles sont les organes fondamentaux de tous les instruments d'optique ; elles sont d'ailleurs appliquées dans une foule de circonstances spéciales ; on peut dire qu'en elles se résume la partie pratique de l'optique. Il est donc essentiel de se faire une idée précise, au moins de leurs propriétés fondamentales. Nous allons les faire connaître aussi succinctement que possible.

736. Foyer principal. — On appelle *axe principal*, dans une lentille, la droite qui passe par les centres des deux surfaces sphériques qui la terminent.

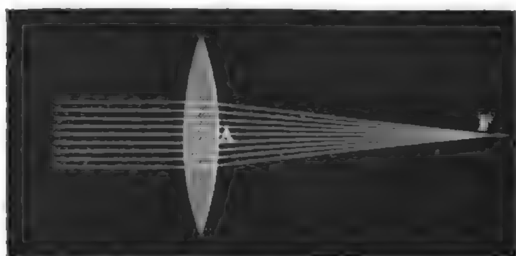


Fig. 672. — Foyer principal d'une lentille convergente.

Lorsque des rayons lumineux (fig. 672) tombent sur une lentille convergente parallèlement à l'axe principal, après les deux réfractions subies à l'entrée et à la sortie, ils viennent tous passer par un même point F que l'on nomme le *foyer principal*. La distance AF, du foyer à la lentille, se nomme la *distance focale principale*. Cette distance est d'autant plus petite que la courbure de la lentille est plus prononcée. Une lentille est dite à long ou à court foyer, suivant que la

distance focale est grande ou petite. Le foyer peut être considéré indifféremment d'un côté ou de l'autre de la lentille et à la même distance, du moins si on néglige l'épaisseur de la lentille.

Lorsque la lentille est divergente (fig. 673), les rayons parallèles à l'axe divergent après la réfraction, mais leurs prolongements viennent se couper à un certain point F qui est le foyer principal virtuel. La distance du point F à la lentille porte toujours le nom de distance focale principale.

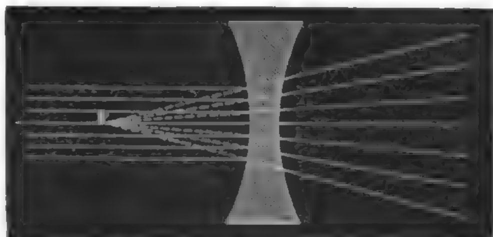


Fig. 673. — Foyer principal d'une lentille divergente.

737. Centre optique. Axes secondaires. — Soient O et O' les centres des surfaces sphériques de la lentille (fig. 674), menons les rayons OI et O'E parallèlement l'un à l'autre, et considérons la droite IE comme un rayon réfracté ; il sera facile de construire le rayon incident SI qui lui aurait donné naissance. Or, au point E l'angle de réfraction intérieure étant le même qu'au point I, l'angle d'émergence devra être égal à l'angle d'incidence ; les rayons SI et ER sont donc parallèles entre eux.



Fig. 674. — Centre optique.

La droite IE coupe l'axe OO' en un point C et détermine deux triangles OCI, O'CE qui sont évidemment semblables et donnent la relation

$$\frac{CO}{CO'} = \frac{R}{R'},$$

R étant le rayon de la sphère qui a pour centre le point O, R' le rayon de la sphère qui a pour centre O'. Or, si au lieu des rayons

parallèles OI et O'E on en mène deux autres quelconques, on aura une relation analogue, c'est-à-dire que le rayon réfracté intérieur passera encore par le point C ; il en sera de même de tous les rayons réfractés correspondant à des rayons incidents et émergents parallèles. On est donc conduit à cette conséquence très-intéressante : que toutes les fois que le rayon incident et le rayon émergent sont parallèles, le rayon réfracté intérieur passe par un point déterminé ; ce point porte le nom de *centre optique*. Dans le cas d'une lentille biconvexe, le centre optique est dans l'épaisseur de la lentille ; il serait même au milieu de cette épaisseur si les rayons de courbure étaient égaux ; dans une lentille plan-convexe, il est sur la face sphérique. Dans tous les cas, il est, par rapport à la lentille, dans une position déterminée que l'on pourra toujours déduire de la relation fondamentale indiquée plus haut, en l'interprétant toutefois convenablement suivant le sens des courbures.

Si l'on néglige l'épaisseur des lentilles, approximation généralement adoptée, on voit que les rayons IS et ER, et le rayon intérieur IE ne forment qu'une seule et même ligne droite, qu'on peut considérer comme un rayon traversant la lentille sans déviation. Toute ligne passant par le centre optique jouit de la même propriété. C'est ce qu'on nomme un *axe secondaire*.

La convergence en un même point des rayons parallèles à l'axe principal n'est pas exclusivement attachée à cette direction particulière. Toutes les fois que des rayons arrivent parallèlement sur une lentille (fig. 675), ils convergent en un même point *f* ; ce point est situé sur l'axe secondaire *a c f* parallèle à la direction donnée. Il y a donc autant de foyers principaux que de directions possibles pour les rayons lumineux.

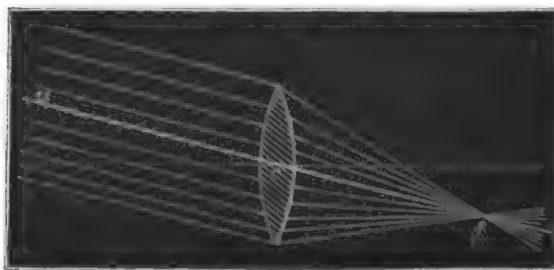


Fig. 675. — Foyer principal sur un axe secondaire.

L'ensemble de ces foyers est placé sur un plan perpendiculaire

à l'axe et passant par le foyer principal ; c'est ce que l'on appelle le *plan focal.*

738. Foyers conjugués. — Lorsqu'un point lumineux S envoie

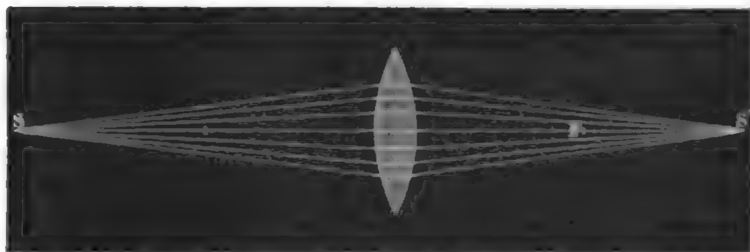


Fig. 676. — Foyers conjugués.

des rayons sur une lentille (fig. 676), après la réfraction tous les rayons viennent concourir en un même point S'. Si le point lumineux était en S', le foyer serait évidemment en S ; ces deux points sont appelés, comme dans la théorie des miroirs, *foyers conjugués.* Lorsque le point lumineux est sur l'axe principal, son foyer conjugué y est aussi ; lorsque le point lumineux est dans une position quelconque en dehors de l'axe, le foyer conjugué est sur l'axe secondaire mené par le point lumineux.

La propriété de ramener à un même point de concours les rayons lumineux partant d'un même point est ici, comme dans les miroirs, le principe de la formation des images. Il est évident, en effet, que si l'œil se place derrière une lentille, au delà du point de croisement des rayons venus d'un objet, ces rayons seront pour lui comme s'ils avaient pour origine les foyers conjugués des différents points de l'objet. L'ensemble ou le lieu géométrique de ces foyers conjugués constitue donc pour l'œil une image. La position et la grandeur de ces images se déterminent par une théorie analogue à celle des miroirs, quoique toutefois un peu plus complexe et d'une approximation moins visible.

739. Formule des lentilles. — Soit (fig. 677) un point lumineux P placé sur l'axe principal d'une lentille biconvexe, et considérons un rayon lumineux particulier PI ; ce rayon se réfracte à l'entrée de la lentille en se rapprochant de la normale et prend une direction II'. Si le milieu qui constitue la lentille s'étendait in-

définiment au delà de sa surface antérieure, le rayon réfracté irait couper l'axe en K. Il est facile d'établir une relation approchée entre la distance $PA = p$ du point lumineux à la surface AI, et la distance $KA = p_1$ du point où le rayon réfracté coupe l'axe.

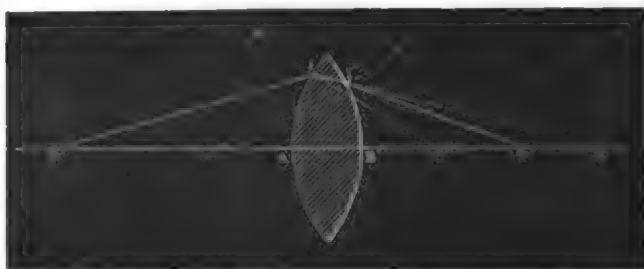


Fig. 677. — Théorie des lentilles.

En effet, la surface du triangle IPC′ est, d'après un théorème connu de geométrie, égal au demi-produit des deux côtés IP et IC′ par le sinus de l'angle compris, lequel étant le supplément de l'angle i a le même sinus, $\sin. i$. On a donc

$$\text{surf. IPC}' = \frac{\text{IP} \cdot \text{IC}'}{2} \sin i.$$

On aurait de même

$$\text{surf. IC}'\text{K} = \frac{\text{IK} \cdot \text{IC}'}{2} \sin r.$$

Or ces deux triangles ayant même sommet ont des surfaces proportionnelles à leurs bases ; donc

$$\frac{p+r}{p_1-r} = \frac{\text{IP}}{\text{IK}} \cdot \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\text{IP}}{\text{IK}} \cdot n,$$

r désignant le rayon IC′. Or, dans l'hypothèse déjà indiquée de rayons très-peu écartés de l'axe, on peut admettre que le rapport de IP à IK est sensiblement le même que celui de p à p_1. La relation précédente devient donc

$$\frac{p+r}{p_1-r} = n \cdot \frac{p}{p_1},$$

d'où

$$rp_1 + npr = (n-1)\, pp_1,$$

et en divisant tous les termes par pp_1r,

$$\frac{1}{p} + \frac{n}{p_1} = \frac{n-1}{r}. \qquad (a)$$

Cette formule, étant indépendante de la position particulière du rayon qui a été choisi, nous montre que tous les rayons partant du point p viennent après la réfraction dans le milieu indéfini terminé par une surface sphérique concourir en un même point K. Cette conclusion est tout à fait générale, quel que soit le sens de la courbure et quelle que soit la position du point radiant; il suffira seulement, pour appliquer la formule (a) dans les différents cas, d'interpréter convenablement le signe des quantités qui y entrent.

Cela posé, continuons à suivre la marche du rayon considéré à travers la lentille. Au point I' une seconde réfraction a lieu, le rayon s'éloigne de la normale et vient couper l'axe principal en P'. Si on suppose un point lumineux en P', et un rayon P'I' se réfractant dans un milieu indéfini terminé par la surface sphérique I'B, ce rayon prolongé viendrait couper l'axe en K. On pourrait donc appliquer aux distances BP' = p' et à la distance BK la formule (a); toutefois, comme le point K est du même côté que le point lumineux, il faudra changer le signe de p_1. Ajoutons que si on néglige l'épaisseur de la lentille, BK a la même valeur que AK et est par conséquent égal à p_1. En tenant compte de ces remarques on a la relation

$$\frac{1}{p'} - \frac{n}{p_1} = \frac{n-1}{r'}. \qquad (b)$$

r' désignant le rayon de la seconde surface sphérique. Ajoutons membre à membre les équations (a) et (b), il vient

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right),$$

relation qui nous montre que tous les rayons partis du point P viennent après la réfraction concourir en P' et qui permet de calculer la position de l'un de ces points, quand on connaît celle de l'autre, l'indice de réfraction n et les rayons r et r' des deux surfaces de la lentille.

Supposons que dans cette dernière équation p devienne infiniment grand, c'est-à-dire que les rayons arrivent parallèlement à l'axe; dans ce cas $\frac{1}{p}$ est égal à zéro et la formule devient

$$\frac{1}{p'} = (n-1)\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}\right).$$

Mais alors p' est précisément la distance focale principale; désignons-la par f, on a

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{r'}\right).$$

En substituant cette valeur dans la formule, celle-ci devient

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f}, \qquad (m)$$

formule tout à fait semblable à celle qui a été obtenue pour les miroirs.

740. Cas où le point lumineux n'est pas sur l'axe. — Dans le cas où le point lumineux n'est pas sur l'axe, mais en est du reste peu éloigné (ce n'est que dans cette hypothèse que les formules sont applicables, puisqu'elles supposent que les rayons s'écartent toujours peu de l'axe), il est aisé de faire voir que les rayons viennent après la réfraction concourir en un même point. En effet, menons par le point donné et le centre de la première surface de la lentille une droite; d'après les raisonnements qui ont servi à établir la formule (a), on voit qu'après la première réfraction les rayons iront concourir en un même point de la droite donnée. Joignant ce point de concours, qui peut être considéré comme la nouvelle origine des rayons lumineux au second centre, on en conclut de même qu'après la seconde réfraction les rayons concourront en un même point de cette nouvelle droite. Il est évident d'ailleurs que le point de concours des rayons doit se trouver sur le rayon sans déviation, c'est-à-dire sur l'axe secondaire. Il y a donc des foyers conjugués sur les axes secondaires, comme sur l'axe principal, et nous allons faire voir que leur position relative est déterminée par une relation identique à la relation (m).

Soit en effet un point M (fig. 678) situé en dessus de l'axe. Un rayon lumineux MI ira couper l'axe secondaire en un point M'

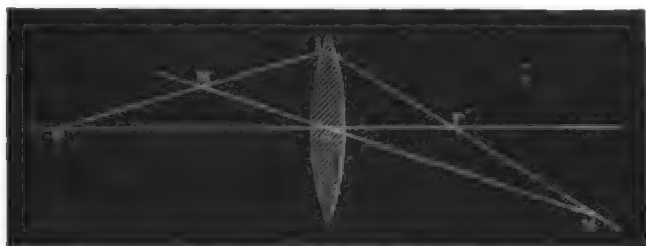


Fig. 678.

qui est son foyer conjugué. Soient m, m' les distances de ces deux points à la lentille. Le rayon incident coupe l'axe principal en un point P, et le rayon réfracté coupe le même axe en P'. Les points P et P' sont évidemment des foyers conjugués auxquels s'applique la relation

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{f},$$

p et p' étant les distances des points P et P' à la lentille. La figure MIM' peut être considérée comme un triangle, dont les trois côtés sont coupés par la transversale POP'. D'après un théorème connu de géométrie, les produits des trois segments non contigus sont égaux ; on a donc

$$\text{MP . IP' . M'O} = \text{PI . M'P' . MO},$$

ou, d'après les approximations qui ont été admises,

$$(p-m)\,p'm' = p\,(m'-p')\,m,$$

ou

$$mm'p' + mm'p = pp'm' + pp'm,$$

d'où, en divisant tous les termes par $pp'mm'$,

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{p'}=\frac{1}{m}+\frac{1}{m'}.$$

Or, le premier membre de cette relation étant égal à $\frac{1}{f}$, il en est

de même du second : d'où on voit que la formule des foyers conjugués, relativement à un axe secondaire quelconque, est exactement la même que celle qui se rapporte à un axe principal.

741. Discussion de la formule. — Il est donc démontré d'une manière générale que toutes les fois qu'un point lumineux se trouve placé en regard d'une lentille, le cône de rayons lumineux qui a ce point pour sommet, et pour base l'ouverture même de la lentille, se trouve transformé par la réfraction en un deuxième cône s'appuyant aussi sur la lentille et ayant pour sommet le foyer conjugué de ce point lumineux. Ces deux foyers conjugués sont situés sur le même axe secondaire à des distances de la lentille données par la relation

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

Cette formule, étant tout à fait identique à celle des miroirs, donne lieu à une discussion pareille. Voici les principaux résultats qu'il est utile de remarquer.

Lorsque le point lumineux est situé très-loin, les rayons sont à peu près parallèles et le foyer conjugué coïncide sensiblement avec le foyer principal. A mesure que le point lumineux s'approche, c'est-à-dire que p diminue, $\frac{1}{p}$ augmente et par suite $\frac{1}{p'}$ diminue ; le foyer conjugué s'éloigne donc de la lentille. Lorsque le point lumineux est à une distance de la lentille égale au double de la distance focale principale, le foyer conjugué est à la même distance. Si en effet dans la formule on fait $p = 2f$, on en déduit $p' = 2f$. Le point lumineux continuant à s'approcher, le foyer conjugue continue à s'éloigner; lorsque le point lumineux arrive au foyer principal, les rayons réfractés deviennent parallèles à l'axe. Si enfin le point lumineux S est placé (fig. 679) entre le foyer principal et

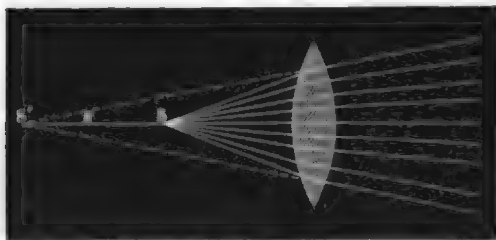


Fig. 679. — Foyer virtuel.

la lentille, p étant plus petit que f, $\frac{1}{p}$ est plus grand que $\frac{1}{f}$; donc p' est négatif, ce qui veut dire que le foyer est virtuel.

Les rayons partis de S sont divergents après la réfraction, et leurs prolongements se coupent en S'.

742. Formation des images. — Cette théorie permet de rendre compte des particularités que présente la formation des images.

Considérons le cas d'un objet AB (fig. 680) placé au devant d'une lentille à une distance plus grande que le double de la distance focale principale. Le foyer conjugé du point A se trouve en *a*, à une distance plus petite que le double de la distance focale principale. On obtient d'ailleurs très-aisément la position exacte. On mène par le point A un rayon parallèle à l'axe, le rayon réfracté passe nécessairement par le foyer principal F et son intersection avec l'axe secondaire AO donne précisément le point *a*.

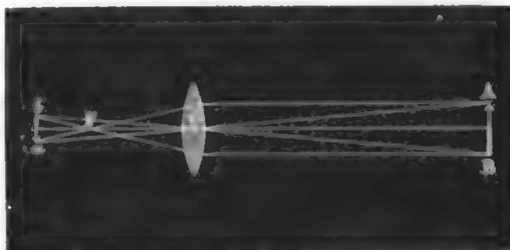


Fig. 680. — Formation des images.

On obtiendrait de même le point *b* et les différents points intermédiaires entre *a* et *b*. L'œil placé au delà de *ab* recevra les rayons comme s'ils venaient de *ab*, et verra par suite une image *ab* renversée et plus petite que l'objet.

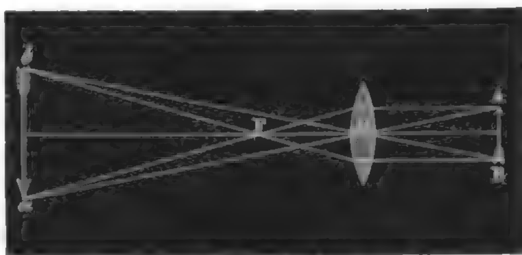


Fig. 681. — Formation des images.

Il est évident que si *ab* était l'objet, l'image AB se trouverait au delà de la distance focale principale renversée et plus grande que l'objet. Ce cas est représenté directement par la figure 681. AB est l'objet placé entre le foyer principal et le double de la distance

focale principale, l'image renversée et agrandie *ab* se forme au delà du double de la distance focale principale.

Le rapport exact entre la grandeur de l'image et celle de l'objet s'établira, dans les différents cas particuliers, à l'aide de la formule fondamentale. En effet, la similitude des triangles AOB, *a*O*b* donne $\frac{AB}{ab} = \frac{p}{p'}$.

Mais, d'après la formule générale, $p' = \frac{pf}{p-f}$; donc

$$\frac{AB}{ab} = \frac{p-f}{f},$$

formule dans laquelle il suffira de mettre à la place de p sa valeur particulière pour obtenir le rapport de la grandeur de l'objet à celle de l'image.

743. Application. — Une droite de 25 millimètres de longueur est placée perpendiculairement sur l'axe, à 35 centimètres d'une lentille de 15 centimètres de foyer; quelles sont la position et la grandeur de l'image ?

La position est donnée par l'expression

$$p' = \frac{pf}{p-f} = \frac{0,35 \ . \ 0,15}{0,35-0,15} = 0^{m},26.$$

La grandeur est donnée par l'expression

$$0,025 \ . \ \frac{f}{p-f} = 0^{m},0187.$$

744. Images par projection. — On peut avec les lentilles, de même qu'avec les miroirs, obtenir la projection des images sur un écran en plaçant celui-ci dans la position exacte des foyers conjugués de l'objet. Les remarques faites plus haut (711) sur ce genre d'images sont entièrement applicables ici. Il y a en effet dans les lentilles comme dans les miroirs une double aberration de sphéricité, provenant des deux surfaces de la lentille; la formule des foyers conjugués donne donc non pas le point où concourent *tous* les rayons, mais seulement le point de concours des rayons centraux. C'est toutefois en ces points que l'éclat est le plus vif et, par suite, que se forment les images par projection.

745. Image virtuelle. — Considérons actuellement le cas d'un objet AB (fig. 682) placé entre le foyer principal et la lentille. Les foyers conjugués des points A et B sont virtuels; on les obtient à la manière ordinaire en menant par les points donnés un rayon parallèle à l'axe, rayon qui après la réfraction va passer par le foyer principal F. L'intersection de ce rayon avec l'axe secondaire correspondant donne précisément le foyer conjugué. Les rayons sont donc divergents, et l'œil placé derrière la lentille verra une image droite et agrandie de l'objet. C'est le principe de la loupe, instrument qui sera décrit plus loin.

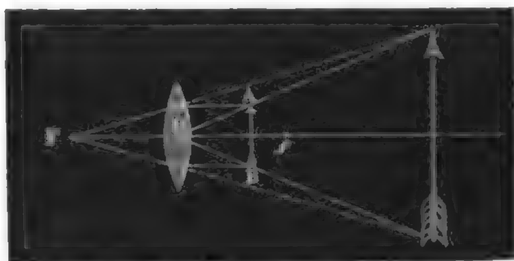


Fig. 682. — Image virtuelle.

746. Lentille concave. — La formule des foyers conjugués est applicable à la lentille concave, pourvu qu'on ait le soin de changer le signe des rayons. Le second membre $\frac{1}{f}$ devient ainsi négatif, et par suite on voit que, quelle que soit la valeur de p, p' sera toujours négatif. Les foyers sont par conséquent virtuels dans tous les cas.

Soit d'après cela un objet AB (fig. 683) placé au-devant d'une lentille biconcave. On obtient le foyer virtuel a par la construction ordinaire; on mène un rayon parallèle à l'axe; le rayon réfracté passe par le foyer virtuel F et son intersection avec l'axe AO détermine le point a; b est le foyer conjugué de B; l'œil placé derrière la lentille recevra les rayons comme s'ils venaient des différents points de ab et verra par conséquent une image ab droite et plus petite que l'objet.

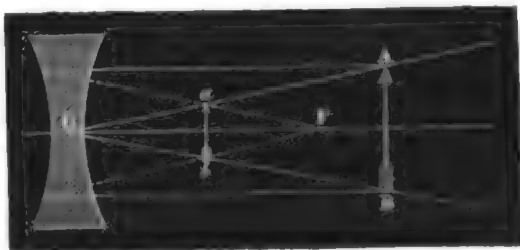


Fig. 683. — Image virtuelle dans une lentille concave.

747. Focomètre de Silbermann. — Le focomètre est un instru-

ment destiné à la mesure de la distance focale des lentilles. Il est fondé sur le principe démontré plus haut, que, lorsque le point lumineux est distant de la lentille d'une quantité égale au double

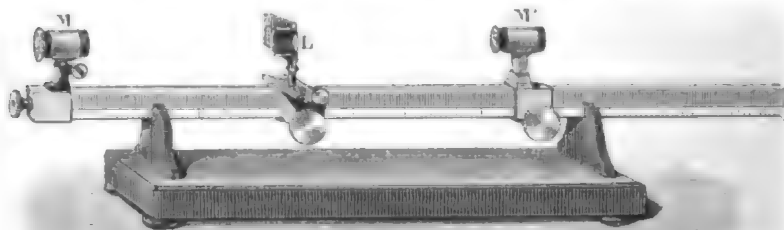


Fig. 684. — Focomètre de Silbermann.

de la distance focale principale, le foyer conjugué se fait à la même distance. Il en résulte que l'image d'un objet placé au même point est exactement égale à l'objet. C'est sur cette remarque qu'est fondé l'instrument. Il se compose d'un banc divisé sur lequel deux curseurs M et M' se meuvent d'un mouvement commun de façon à rester toujours à la même distance de la lentille L, dont on veut mesurer le foyer. En M et en M' se trouvent deux petites règles divisées faites en matière translucide, telle que de la corne ou de l'ivoire mince. On fait varier la distance commune des deux curseurs, jusqu'à ce que l'image des divisions de l'un des systèmes coïncide rigoureusement avec celles de l'autre. La distance focale se trouve alors exactement mesurée par le quart de la distance des deux curseurs.

748. Chambre noire. — Les images que l'on obtient dans la chambre noire (683) sont d'autant plus nettes que l'ouverture est plus petite. Mais à mesure que l'ouverture diminue, la quantité de lumière devient naturellement plus petite, et, par suite, l'image est de moins en moins éclairée. Les propriétés des lentilles permettent de lever cette difficulté. Si, en effet, à la place de la petite ouverture on place une lentille d'une ouverture plus ou moins considérable et qu'on dispose un écran à son foyer principal, les objets extérieurs suffisamment éloignés donneront lieu à des images renversées, conformément aux propriétés précédemment indiquées. Cette image ne sera évidemment nette qu'autant que les objets seront à une assez grande distance, mais ils pourront d'ailleurs être

à des distances extrêmement diverses; car, d'après la formule des foyers, dès que le point lumineux a dépassé d'une façon un peu notable le double de la distance focale principale, le foyer conjugué n'éprouve que des variations de position insensibles.

La figure 685 représente la chambre obscure qu'emploient quelquefois les dessinateurs et qui leur permet de faire rapidement



Fig. 685. — Chambre noire pour le dessin.

le dessin d'un paysage. C'est une sorte de tente pouvant se fermer complétement avec des tentures opaques. Au sommet est placée une ouverture sous laquelle on enchâsse une lentille, et au-dessus un miroir qui renvoie les rayons sur la lentille. Il y a avantage à supprimer le miroir et à employer l'objectif particulier qui est représenté séparément dans la figure 686. Les rayons lumineux venant des objets extérieurs tombent sur une surface convexe où ils éprouvent une première réfraction; de là ils rencontrent la surface plane inclinée sous un angle tel, qu'ils se réfléchissent tota'ement suivant le sens vertical et viennent émerger par une surface concave

vers l'extérieur. Le résultat est donc le même que s'ils s'étaient réfractés à travers un ménisque convergent. L'image vient se faire en A sur une feuille de papier, et le dessinateur, assis dans la tente, peut en suivre aisément tous les contours. Cet instrument, assez employé autrefois, et qui eut même une certaine vogue, est à peu près oublié aujourd'hui, ou du moins il est relégué au rang des jouets d'optique. Il servait en effet surtout pour faire des croquis que l'artiste utilisait ensuite dans son travail. Aujourd'hui ces croquis sont très-avantageusement remplacés par des épreuves photographiques.

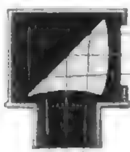


Fig. 686. — Objectif de la chambre noire.

749. Chambre noire des photographes. — La chambre noire des photographes est formée d'une boîte sur l'une des faces de laquelle est fixé sur une ouverture convenable un tube AB terminé par l'objectif. Cet objectif est formé des deux lentilles E, L. L'emploi de deux lentilles, à la place d'une lentille unique, est une chose très-fréquente en optique et il est facile d'en comprendre la raison. Supposons en effet un faisceau de rayons parallèles arrivant sur un pareil système : après la réfraction sur la première lentille, les rayons en subissent une seconde, et leur point de concours va se faire beaucoup plus près. On a donc obtenu le même effet qu'en employant une lentille d'un foyer plus court, mais avec l'avantage d'un

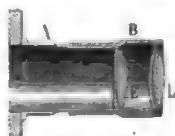




Fig. 687. — Chambre noire des photographes.

plus grand éclairement. Ceci résulte de ce que, pour éviter les aberrations de sphéricité, les lentilles ne doivent jamais embrasser qu'une petite portion des sphères qui les terminent ; si donc les sphères ont un très-petit rayon, c'est-à-dire si le foyer est court, la lentille sera naturellement très-petite, et, par suite, elle admettra peu de lumière. C'est à cet inconvénient, ainsi qu'à quelques autres dont nous n'avons pas à parler ici, que remédie la disposition adoptée. En G se trouve une glace dépolie sur laquelle vient se former l'image de l'objet que l'on veut reproduire. Pour *mettre au point*, c'est-à-dire pour placer la glace à l'endroit qui correspond exactement au foyer conjugué de l'objet, on se sert d'abord du tirage de la boîte qui présente une partie M plus petite et rentrant dans la portion N, et, pour achever, du pignon V qui, à l'aide d'une cremaillère, fait mouvoir la portion du tube AB qui porte l'objectif. C'est lorsque la mise au point est aussi parfaite que possible que l'on substitue à la glace dépolie la plaque sensibilisée sur laquelle doit venir l'épreuve[1].

1. Les procédés photographiques sont aujourd'hui infiniment variés, non pas en ce qui regarde la partie optique de l'appareil, mais dans les réactions chimiques, et par suite dans la nature des produits employés. Le principe fondamental remonte au physicien anglais Talbot ; oublié pendant les grands succès de Daguerre, il se retrouve aujourd'hui dans tous les procédés. Il consiste à obtenir d'abord une épreuve inverse appelée *négative*, dans laquelle les *blancs* de l'objet sont *noirs* et *vice versa*. Cette épreuve obtenue sur une plaque plus ou moins transparente est placée ensuite sur une feuille de papier sensibilisé au chlorure d'argent et exposée aux rayons solaires. Les blancs des négatifs donnent lieu alors à des noirs sur le papier sensible et l'on obtient ainsi l'épreuve positive. Le même négatif ou *cliché* peut servir à obtenir un grand nombre de positifs.

On se sert le plus souvent aujourd'hui, pour les clichés, d'une plaque de verre sur laquelle on verse une couche d'albumine ou de collodion sensibilisés par un sel d'argent. Voici une des nombreuses formules qu'on peut employer :

Éther sulfurique	300 grammes
Alcool à 40°	200 »
Coton-poudre.	5 »

On ajoute à ce mélange, après les avoir broyés au mortier de porcelaine :

Iodure de potassium	13 grammes.
— d'ammonium	1gr,75
— de cadmium	1gr,75
Bromure de cadmium.	1gr,25

On verse le collodion sur la glace que l'on immerge ensuite dans une dissolution à

750. Emploi des lentilles dans les projections. — Les lentilles sont continuellement employées en physique pour projeter l'image de diverses expériences, et les rendre visibles pour un très-grand nombre de spectateurs à la fois. Les dispositions varient d'un cas à l'autre et ne sauraient être indiquées d'une manière générale.

751. Microscope solaire. — Lanterne magique. — Le microscope solaire se compose essentiellement d'une lentille convergente, à

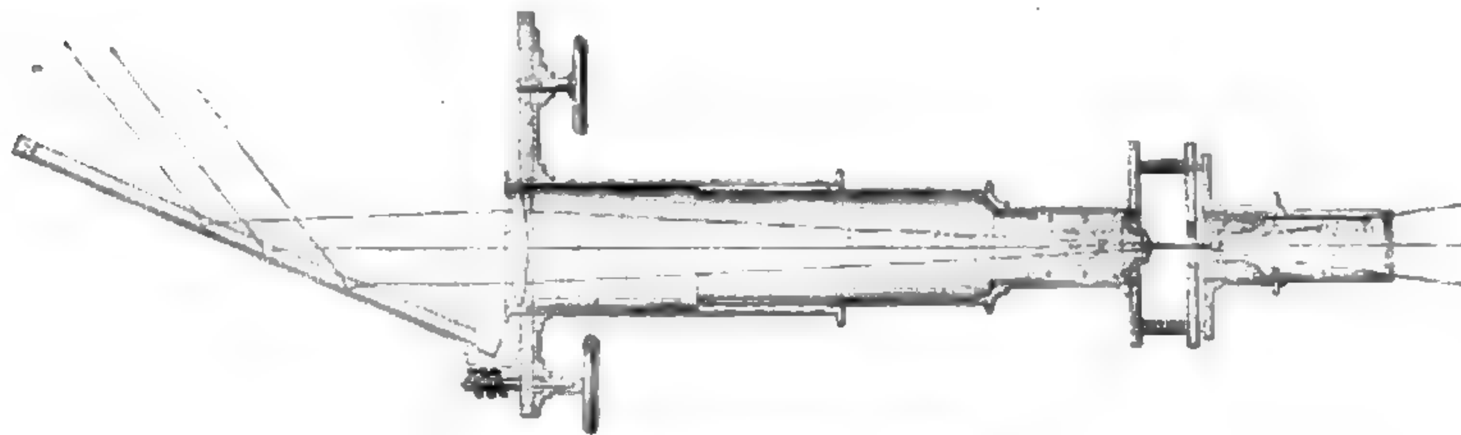


Fig. 688. — Microscope solaire.

court foyer, donnant une image très-agrandie d'un petit objet placé un peu au delà du foyer. Pour donner à cette image un éclat suffisant, on éclaire l'objet au moyen de rayons solaires réfléchis par une glace et concentrés par une lentille à large surface; c'est ce que l'on appelle l'*illuminateur*. Souvent, au lieu d'une lentille simple, à très-court foyer, on prend une combinaison d'une lentille convexe et d'une lentille concave qui, pour le même agrandissement, donne plus de lumière.

Le foyer lumineux, dans les régulateurs de lumière électrique,

10 °/₀ d'azotate d'argent. La couche de collodion devient opaline, on retire la plaque, on l'égoutte et on la met dans le châssis à poser.

La pose terminée, on fait venir l'épreuve par l'action d'un liquide dont voici une formule :

Eau distillée	250	grammes
Acide pyrogallique	1	»
Acide acétique cristallisable.	20	»

Quand l'image est arrivée au degré de vigueur désirable, on la fixe soit par une dissolution d'hyposulfite de soude à 25 ou 30 °/₀, soit par du cyanure de potassium à 3 °/₀, et le cliché est terminé. Pour obtenir l'épreuve positive, on pose le cliché sur un châssis vitré au-dessus d'une feuille de papier sensibilisé au chlorure d'argent (la sensibilisation de la feuille positive s'obtient par l'immersion d'abord dans une dissolution de sel marin à 3 ou 4 °/₀, puis dans du nitrate d'argent à 18 °/₀). On arrête l'exposition quand on croit le ton suffisamment fort, on fait virer la teinte par un sel d'or, et on fixe une dernière fois à l'hyposulfite de soude. Il n'y a plus alors qu'à laver et faire sécher.

est placé ordinairement dans une lanterne, au foyer d'un réflecteur sphérique ou parabolique; le faisceau est ensuite concentré par une lentille et peut ainsi éclairer un objet dont l'image est ensuite don-

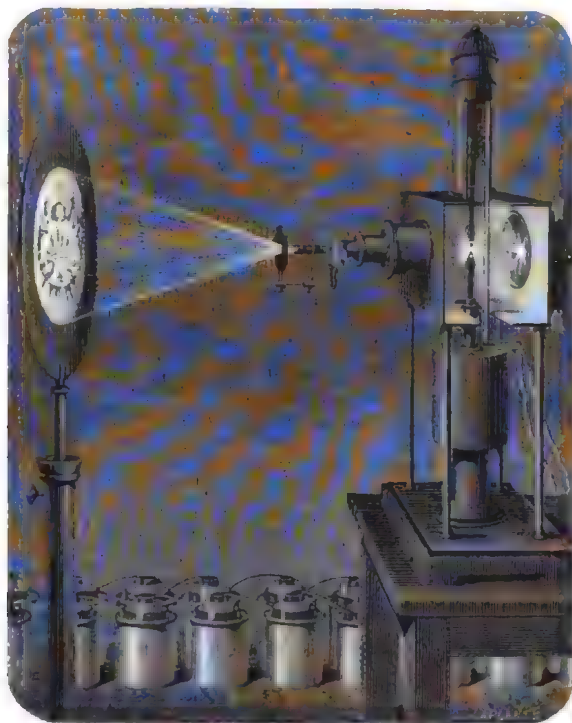


Fig. 689. — Microscope photo-électrique.

née par une lentille placée au delà. On peut ainsi projeter des objets microscopiques, et l'appareil prend dans ce cas le nom de microscope photo-électrique (fig. 689).

La lanterne magique est un jouet très-connu et dont la disposition est analogue à la précédente. C'est une boîte carrée contenant une lampe. Un réflecteur placé derrière la lampe renvoie la lumière sur une des faces de la boîte. Sur cette face s'adapte un tube terminé à chacune de ses extrémités par une lentille; l'une d'elles sert à éclairer l'objet, l'autre à en donner une image. Les objets sont ordinairement des peintures grossières sur verre. On les place renversées dans la boîte et leur image se trouve ainsi redressée.

CHAPITRE LXI.

DISPERSION. — ÉTUDE DU SPECTRE.

752. Expérience de Newton. — Dans le § 730, nous avons examiné l'effet du prisme sur la vision, mais nous n'avons considéré que l'effet propre de la réfraction. Un phénomène d'un genre tout différent, qu'on nomme dispersion, et qui accompagne toujours

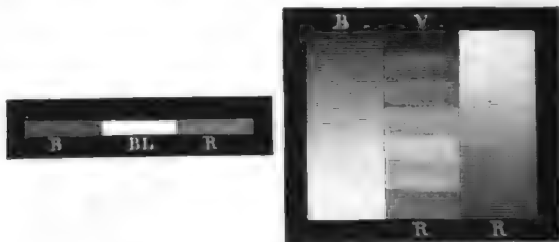


Fig. 690. — Expérience de Newton.

la vision à travers les prismes, est mis en évidence par l'expérience suivante de Newton.

Sur un tableau noir on dispose, à côté l'un de l'autre et sur une même ligne horizontale (fig. 690), trois bandes étroites, l'une bleue, l'autre blanche, la troisième rouge. Il faut choisir pour faire cette expérience des bandes dont les couleurs soient très-vives et très-pures; les pétales de capucine et de certaines espèces de volubilis conviennent très-bien pour cela.

Si on place l'arête du prisme horizontalement et qu'on regarde les trois bandes colorées, on observe les apparences suivantes :

1° La bande blanche conserve la même largeur horizontale,

mais elle est fortement dilatée dans le sens vertical, et présente la forme d'un rectangle.

Ce rectangle n'est plus blanc, comme la bande qui lui a donné naissance; il est coloré de diverses nuances qui passent insensiblement de l'une à l'autre ; c'est ce que l'on appelle un *spectre*. A partir de la région supérieure, ces couleurs se succèdent dans l'ordre suivant :

Violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

2° La bande rouge donne lieu aussi à une image rectangulaire de même dimension que celle de l'image blanche, mais dans laquelle on distingue seulement d'une façon sensible la partie rouge. Celle-ci est toujours sur le même alignement horizontal que le rouge de l'image centrale et occupe la même largeur. Sur les autres parties du rectangle, la coloration est peu marquée, et peut même être tout à fait nulle si l'on opère sur certains rouges très-purs que l'on peut rencontrer accidentellement.

3° La bande bleue est aussi remplacée par un rectangle de même largeur que les précédents, et dans lequel se trouve seulement un peu sensible la portion bleue et souvent un peu de violet, sur la même ligne horizontale que la partie de même couleur dans l'image centrale. Si l'on emploie, pour former la bande bleue, une portion de pétale de certains volubilis, les autres parties du rectangle peuvent être complétement dépourvues de coloration.

753. Conséquences de l'expérience de Newton. — Composition des couleurs. — Si, se servant toujours de la bande blanche comme terme de comparaison, on répète l'expérience précédente avec des bandes colorées d'une manière quelconque, on observe toujours une image rectangulaire de *même largeur* dans laquelle on rencontre les diverses nuances de l'image-type et à la même hauteur que dans cette dernière. Jamais le rectangle ne dépasse la largeur de celui qui provient du blanc ; jamais on ne rencontre d'autres teintes que celle qu'il présente lui-même.

Ces expériences établissent rigoureusement les propositions suivantes :

Les rayons lumineux qui proviennent des différents points d'un corps blanc, et qui cheminent suivant une même direction, ne sont

point simples : ils sont en réalité la superposition de rayons diversement réfrangibles et diversement colorés. La réfraction qui s'opère à l'entrée et à la sortie du prisme sépare ces différents rayons et les fait apparaître avec leurs couleurs propres.

Toutes les couleurs que nous présentent les corps sont composées aussi comme l'est la lumière blanche, mais il n'y a pas d'autres éléments que dans cette dernière ; ce sont les mêmes rayons, une partie seulement d'entre eux peut faire défaut ; c'est l'action résultante de ces divers rayons qui produit la teinte que perçoit notre œil, de même que le blanc est le résultat de l'action simultanée de tous les rayons élémentaires.

754. Spectre solaire. — En dehors des sources de lumière, les corps n'ont pas de lumière propre ; ils ne sont que des centres secondaires mis en mouvement par la lumière du soleil ; on est donc conduit à penser par les expériences précédentes que les divers rayons provenant du soleil sont précisément formés par la superposition de rayons de colorations et de réfrangibilités diverses. C'est là le principe de la célèbre expérience du spectre solaire. Elle s'exécute de la manière suivante :

On introduit dans une chambre obscure un faisceau de lumière solaire qui y pénètre par une ouverture étroite ; le faisceau, reçu sur un écran blanc, donne lieu à une image circulaire du soleil (683). Si alors on interpose (fig. 691) sur le trajet du faisceau un prisme dont l'angle de réfringence soit en bas, le faisceau est rejeté vers la partie supérieure, et il donne lieu sur l'écran à une image oblongue terminée supérieurement et inférieurement par deux demi-circonférences et fortement dilaté dans le sens perpendiculaire aux arêtes du prisme. Dans le sens horizontal, les dimensions ne sont pas altérées et restent les mêmes que celles de l'image circulaire du soleil. C'est cette image que l'on nomme le *spectre solaire*. Elle présente les couleurs qui ont été nommées plus haut. Dans la disposition indiquée par la figure, le violet est à la partie supérieure, c'est la couleur la plus réfrangible ; le rouge est la couleur la moins réfrangible, il est placé à la partie inférieure. La figure 1 de la planche III montre la disposition relative des diverses couleurs.

Cette expérience capitale met en pleine évidence la composition d'un rayon de lumière solaire, et le montre comme constitué de rayons élémentaires d'une réfrangibilité et d'une couleur pro-

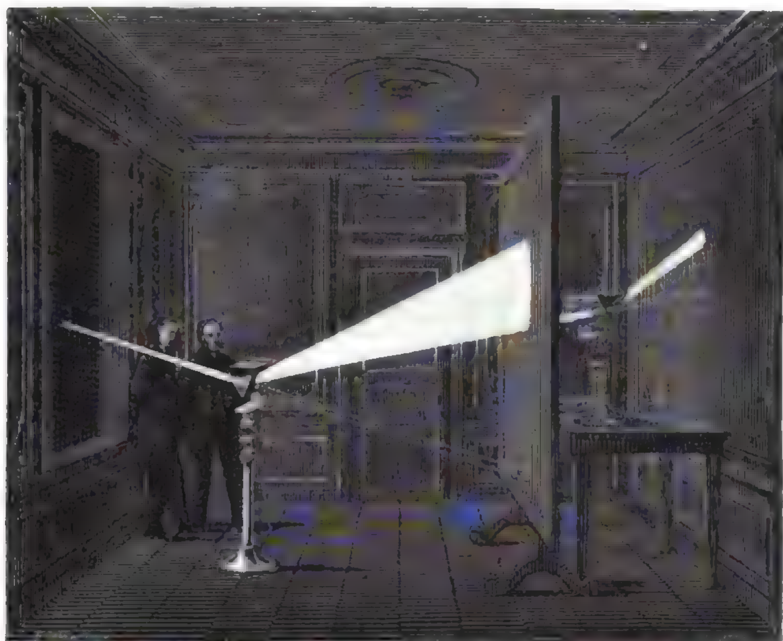


Fig. 691. — Expérience du spectre solaire.

pres ; ces divers rayons superposés suivant une même direction composent un rayon de lumière blanche.

L'existence de ces rayons élémentaires est rendue sensible par l'expérience suivante. Dans la partie du spectre correspondante à une couleur déterminée, au rouge par exemple, on pratique une petite ouverture qui laisse passer un faisceau sur le trajet duquel on place un second prisme. Il se produit une seconde réfraction, une dilatation moindre que la précédente, et on obtient, sur un second écran, un spectre monochromatique, sur lequel on peut expérimenter de la même manière. On obtient ainsi successivement des faisceaux de moins en moins dilatés et qui se rapprochent de plus d'un rayon d'une couleur et d'une réfrangibilité simples.

755. Recomposition de la lumière blanche. — La théorie de la composition de la lumière est confirmée par la recomposition de la

lumière blanche, en réunissant les diverses couleurs du spectre. On effectue cette recomposition de diverses manières :

1° On reçoit le faisceau spectral sortant du prisme sur sept petits miroirs plans (fig. 692), sur chacun desquels tombe la portion du spectre à peu près correspondante à une couleur déterminée ; on

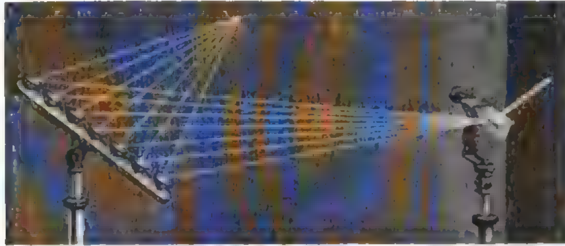


Fig. 692. — Recomposition de la lumière blanche.

donne aux miroirs une inclinaison telle, que les faisceaux réfléchis viennent concourir à peu près en un même point. Si en ce point on place un écran, on obtient une lumière blanche.

2° Le faisceau, à sa sortie du prisme, est reçu sur une lentille convergente (fig. 693) ; les divers rayons colorés sont ramenés par

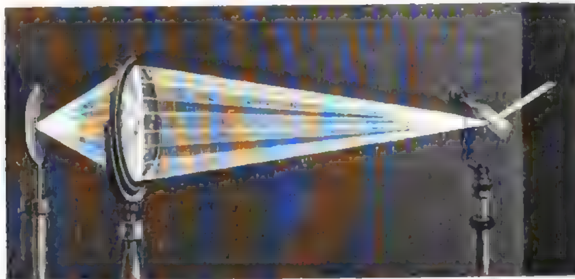


Fig. 693. — Recomposition de la lumière blanche par une lentille.

la lentille et viennent concourir à peu près en un point où l'on place un écran sur lequel se forme une image blanche. Il est à remarquer toutefois que cette image n'est tout à fait blanche que dans les parties centrales; sur les bords, la superposition des diverses couleurs n'est pas complète, et il y a des contours colorés.

3° On peint, sur un disque de verre, des secteurs, suivant les diverses nuances du spectre, et dont l'étendue relative est à peu

près pareille à celle des couleurs correspondantes dans le spectre lui-même. Si, à l'aide d'un petit pignon, d'une roue et d'une corde de transmission (fig. 694), on imprime au disque un mouvement suffisamment rapide, les sensations des diverses couleurs se superposent, et l'on aperçoit le disque avec une teinte blanche. On peut, pour rendre l'expérience plus frappante, projeter, à l'aide d'une lentille, sur un écran blanc, le disque coloré; en plaçant convenablement la lentille on obtient une image très-nette du disque; mais au moment de la rotation, on aperçoit une image entièrement blanche.

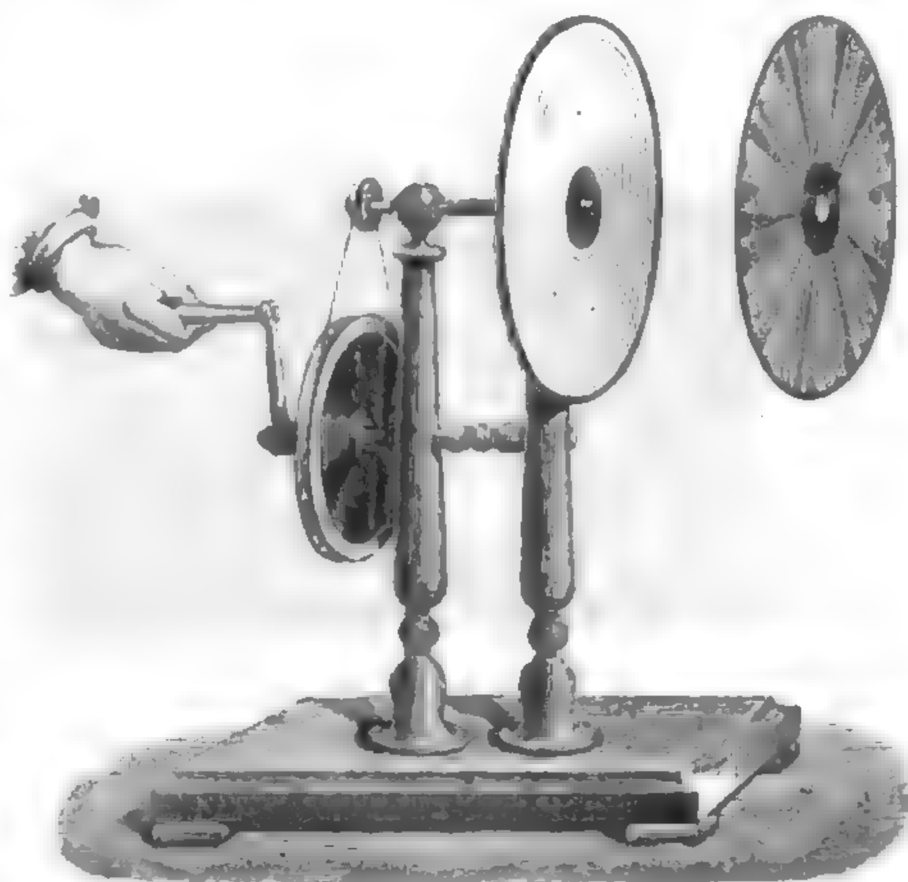


Fig. 694. — Recomposition de la lumière blanche par le disque tournant.

756. Composition des couleurs. — Couleurs complémentaires. — Dans le second procédé pour recomposer la lumière blanche, si l'on intercepte, avec un écran, une portion du faisceau prismatique, l'image formée par la lentille prend une teinte qui est la résultante des couleurs qui ne sont pas interceptées. Si, après avoir intercepté une portion du faisceau et obtenu une image d'une certaine teinte, on intercepte l'autre portion en laissant passer la première, on obtient une image d'une autre teinte. Ces deux teintes réunies formeraient évidemment du blanc. Les couleurs qui présentent cette propriété sont appelées couleurs complémentaires,

On peut varier les expériences de cette nature en se servant d'écrans percés de diverses ouvertures, de façon à laisser passer telle portion du spectre que l'on veut, et l'on obtient ainsi des couleurs composées, dont quelques-unes peuvent ressembler à une des couleurs du spectre. Ainsi en laissant passer du jaune et du bleu on obtient du vert ; le violet peut s'obtenir par le mélange du bleu et du rouge, etc. Mais ces couleurs diffèrent de celles du spectre par

leur composition ; en les regardant à travers un prisme on sépare les teintes élémentaires qui les constituent.

Le tableau suivant, donné par M. Helmholtz, fait connaître le résultat de la combinaison, deux à deux, des cinq couleurs élémentaires les plus nettes du spectre.

	Rouge.	Jaune.	Vert.	Bleu.	Violet.
Rouge.	Rouge.	Orangé.	Jaune terne.	Rose.	Pourpre.
Jaune.	Orangé.	Jaune.	Vert jaunâtre.	Blanc.	Rose.
Vert.	Jaune terne.	Vert jaunâtre.	Vert.	Vert bleuâtre.	Bleu pâle.
Bleu.	Rose.	Blanc.	Vert bleuâtre.	Bleu.	Indigo.
Violet.	Pourpre.	Rose.	Bleu pâle.	Indigo.	Violet.

Dans la nature on trouve rarement des couleurs simples, c'est-à-dire des couleurs qui, vues à travers un prisme, donnent un spectre monochromatique. Cela se rencontre pourtant quelquefois, et c'est avec des couleurs de ce genre qu'il convient de faire l'expérience décrite au commencement de ce chapitre.

757. Couleurs propres des corps. — Les explications précédentes permettent de se rendre compte avec précision des causes physiques de la couleur des corps. La couleur est une qualité non pas précisément du corps, mais de la lumière. Dans une chambre complétement close, il n'y a pas de couleur. Or la lumière, quand elle émane du soleil du moins, ou de la plupart des sources utilisées dans l'industrie ou l'économie domestique, renferme toutes les couleurs du spectre. Si les molécules des corps ébranlées par chacun des rayons lumineux renvoyaient à l'œil tous ces rayons sans les altérer ou faisaient subir à chacun d'eux une perte égale, la sensation qui en résulterait serait celle du blanc. Mais il n'en est pas ainsi ; quelques-unes des radiations sont absorbées dans une proportion plus forte que d'autres ; c'est alors comme si dans le

faisceau sortant du prisme on interceptait un certain nombre de rayons, et l'œil reçoit l'impression de la teinte résultante des rayons élémentaires qui lui parviennent. Un corps qui absorberait toutes les radiations ne renverrait à l'œil aucune lumière; il serait invisible ou *noir*.

758. Coloration par transparence. — La coloration par transparence, celle, par exemple, des verres colorés, admet une cause analogue. Ces corps se laissent pénétrer sans les éteindre par les diverses espèces de rayons, avec une facilité variable d'une espèce à une autre. Lors donc qu'un faisceau de lumière blanche vient à les traverser, les différents rayons éprouvent des pertes inégales au fur et à mesure de leur trajet; le faisceau émergent ne renferme plus les éléments constitutifs de la lumière blanche, et il est coloré.

Cette circonstance peut donner lieu à un phénomène très-curieux, mais très-facile à expliquer, qu'on appelle le *dichroïsme*. C'est la propriété que possèdent certains corps d'offrir des couleurs très-distinctes suivant qu'on les regarde sous une épaisseur plus ou moins grande. C'est ainsi, par exemple, que si l'on verse dans un verre à expérience une dissolution de chlorure de chrome, la partie inférieure où l'épaisseur est moindre paraîtra verte, tandis que la partie supérieure a une teinte brune passant au rouge. La teinture de tournesol présente un phénomène analogue : bleue sous une épaisseur un peu grande, elle est rouge violacé en lames minces. En réalité, toutes les substances transparentes et colorées sont dichroïques, c'est-à-dire que leur teinte change avec l'épaisseur, mais on n'observe que rarement des modifications aussi nettes que celles qui viennent d'être indiquées; le plus ordinairement c'est une variation plutôt de l'intensité de la couleur que de la couleur elle-même.

L'explication du dichroïsme se trouve dans l'inégale absorption des rayons colorés élémentaires. Supposons, par exemple, qu'une certaine substance absorbe très-rapidement tous les rayons, à l'exception du rouge et du vert, et que d'ailleurs cette dernière couleur soit elle-même beaucoup plus absorbable que le rouge. Tant que l'épaisseur traversée sera petite, l'éclat des rayons verts masquera l'effet du rouge, et le corps paraîtra vert. Mais, après avoir

traversé une épaisseur un peu grande, les rayons verts auront subi une perte très-grande relativement à celle des rayons rouges, et le corps devra paraître rouge.

759. Spectres des lumières artificielles. — Les lumières artificielles donnent un spectre analogue au spectre solaire, mais toutefois pas absolument identique; ainsi les rayons jaunes sont en proportion plus considérable. Aussi est-il facile de confondre, quand ils sont éclairés par ces lumières, certains bleus de jour avec le vert, précisément parce qu'en ajoutant du jaune à du bleu on obtient du vert.

On peut composer des sources artificielles dont le spectre soit très-différent du spectre solaire. Vues avec ces lumières, les couleurs des corps sont naturellement altérées. On peut même arriver, en se servant de diverses substances minérales, à obtenir des feux ne renfermant qu'une seule couleur; ainsi les feux rouges s'obtiennent avec des sels de strontium, les feux jaunes avec la soude, etc.; tous les corps éclairés par ces feux ont la même couleur, dont l'intensité seule est modifiée par la nature propre de leur surface.

760. Achromatisme. — La composition de la lumière blanche et par suite des diverses lumières fournies par les corps donne lieu à une conséquence des plus fâcheuses, relativement aux propriétés des lentilles. La distance focale d'une lentille dépend de l'indice de réfraction de la substance dont elle est formée, mais cet indice est différent suivant qu'il s'agit d'une couleur ou d'une autre. Ainsi le foyer des rayons violets doit se faire plus près de la lentille que le foyer des rayons rouges, puisque leur réfrangibilité est plus grande. Lorsque, par conséquent, on se servira d'une lentille convergente dans un instrument d'optique pour obtenir l'image d'un objet, il y aura en réalité une infinité d'images correspondantes à chacun des rayons élémentaires venant de l'objet. Ces diverses images examinées avec un système optique quelconque se superposent dans la plus grande partie de leur surface, et par conséquent en ces points la teinte de l'objet n'est pas altérée. Mais sur les bords cette superposition n'est pas complète; il en résulte que certaines images colorées débordent sur les autres et donnent lieu à des contours colorés ou irisés. Ces auréoles constituent un défaut des plus graves et tout à fait intolérable dans les instruments d'op-

tique. Ce sont, en effet, les contours des objets, quels qu'ils soient, que l'on examine, qu'il est essentiel de bien voir, car c'est par eux seuls que l'on peut juger de leur forme exacte et de leurs dimensions. Aussi a-t-on cherché par des méthodes convenables à faire disparaître cette grave imperfection qui constitue l'*aberration de réfrangibilité*. Les instruments et les lentilles qui en sont exempts sont dits *achromatiques*.

761. Possibilité de l'achromatisme. — Pendant longtemps on a supposé que l'achromatisme était impossible à obtenir, et Newton paraît lui-même avoir eu cette opinion. On se fondait sur ce que la dilatation du faisceau étant une conséquence nécessaire de la réfraction, on ne saurait la faire disparaître qu'en faisant disparaître la réfraction elle-même; mais alors, s'il n'y a pas de réfraction, il n'y a pas non plus d'instrument d'optique, puisque ceux-ci utilisent les images que produit la réfraction elle-même.

Ce raisonnement est erroné. En effet, l'action d'un prisme sur un faisceau lumineux a un double résultat, celui de le réfracter et de le dilater. Le second phénomène porte particulièrement le nom de *dispersion*; on le définit numériquement par la *différence entre l'indice de réfraction des rayons violets et celui des rayons rouges*. Or il est bien vrai que la dispersion est une conséquence de la réfraction, mais les deux choses ne sont pas, quant à leur intensité, proportionnelles l'une à l'autre. Ainsi dans une substance la réfraction moyenne peut être plus grande que dans une autre, et la dispersion plus petite, ou *vice versa*.

Il résulte de là que si, à la suite d'un prisme traversé par un faisceau lumineux, on en place en sens inverse un second d'une substance différente et dont la dispersion soit plus grande, on pourra ramener au parallélisme les rayons rouges et violets, par exemple, sans détruire pour cela complétement l'effet de la réfraction première. On aura donc un système de deux prismes qui produira une déviation, et pas de coloration. Ce petit appareil se rencontre dans tous les cabinets de physique. Le premier prisme est en *crown-glass*, verre d'optique analogue au verre ordinaire; le second en *flint-glass*, analogue au cristal [1].

1. Le crown-glass est une sorte de silicate de potasse et de chaux; dans le flint-glass, qui est plus dispersif, une partie de la chaux est remplacée par l'oxyde de plomb.

762. Calcul de l'achromatisme des prismes. — Dans le cas de très-petits angles d'incidence, qui est le seul applicable aux instruments d'optique, on peut aisément calculer le rapport qui doit exister entre les angles de réfringence des deux prismes, pour que le système soit achromatique, les angles de réfringence étant d'ailleurs eux-mêmes très-petits. En effet, les équations indiquées au § 731 deviennent, dans les conditions particulières d'approximation où nous nous plaçons ici : $i = nr$, $i' = nr'$, et par suite $D = i + i' - A = n(r + r') - A$. Mais $r + r' = A$, donc $D = (n - 1) A$. Le second prisme placé en sens inverse, à la suite du premier, produirait une déviation $D' = (n' - 1) A'$. La déviation effective produite par l'ensemble des deux prismes a donc pour expression

$$(n - 1) A - (n' - 1) A'$$

Supposons que dans cette formule n représente l'indice de réfraction des rayons rouges. Soient δ et δ' les dispersions des deux substances ; si au lieu des rayons rouges nous considérons les rayons violets, la déviation produite différera de celle qu'exprime la formule précédente de la quantité $\delta A - \delta' A'$. Or, si les rayons rouges et les rayons violets doivent être ramenés au parallélisme, cette quantité doit être nulle ; on aura donc $\delta A = \delta' A'$, d'où

$$\frac{\delta}{\delta'} = \frac{A'}{A}.$$

La condition d'achromatisme est donc *que les angles de réfringence des prismes soient inversement proportionnels à la dispersion des substances qui les forment.* Ce résultat a été vérifié expérimentalement par l'emploi des *diasporomètres ;* ce sont des instruments dans lesquels à un prisme d'angle constant en crown on oppose un prisme en flint dont on fait varier l'angle jusqu'à ce que l'achromatisme soit obtenu.

763. Lentilles achromatiques. — C'est par une disposition analogue que l'on achromatise les lentilles. Les premières lentilles achromatiques ont été construites par l'opticien anglais Dollond, vers 1757. Elles se composent d'une lentille convergente en crown à laquelle est accolée une lentille divergente en flint. Si les deux lentilles sont

convenablement choisies, leur ensemble conserve encore les propriétés des lentilles convergentes, et peut fournir une image réelle des objets vus au travers, mais les rayons diversement colorés ne sont plus séparés les uns des autres et l'image ne présente pas de contours irisés. On peut établir aisément la condition de l'achromatisme d'une lentille. La distance focale de la lentille de crown est liée aux rayons de courbure de la lentille par la relation (739)

$$\frac{1}{F} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right).$$

De même la distance focale f de la lentille en flint est donnée par la formule

$$\frac{1}{f} = (n'-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right).$$

Or on démontre très-aisément [1] que l'association de ces deux lentilles donne lieu à une distance focale φ, donnée par la relation

$$\frac{1}{\varphi} = \frac{1}{F} - \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) - (n'-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right).$$

Supposons que dans cette formule n et n' désignent les indices de réfraction des rayons rouges; si on considère les rayons violets, l'expression différera de la précédente de la quantité

$$\delta\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) - \delta'\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right);$$

et pour que le foyer des rayons violets se fasse au même point que celui des rayons rouges, il faut que cette quantité soit nulle, c'est-à-dire que

$$\delta\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right) = \delta'\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right). \qquad (1)$$

C'est la condition de l'achromatisme.

Si l'on introduit dans cette dernière formule les distances focales des deux lentilles, on obtient

$$\frac{\delta}{F(n-1)} = \frac{\delta'}{f(n'-1)}, \quad \text{ou} \quad \frac{F}{f} = \frac{\delta}{n-1} : \frac{\delta'}{n'-1}.$$

On désigne la quantité $\frac{\delta}{n-1}$ sous le nom de pouvoir dispersif

1. Voyez les problèmes.

de la substance. On peut donc énoncer cette proposition :

Dans une lentille achromatique, le rapport des pouvoirs dispersifs est égal au rapport des distances focales des deux lentilles.

On remarquera que dans la formule (1) il entre quatre quantités à déterminer, ce sont les quatre rayons de courbure. Assez ordinairement, on fait coïncider exactement la face postérieure de la lentille de crown avec l'une des faces de celle de flint, ce qui réduit le nombre des inconnues à trois ; le problème n'en est pas moins très-indéterminé et comporte un grand nombre de solutions. Mais ces solutions doivent être compatibles avec celles qui réduisent le plus possible l'aberration de sphéricité. Ajoutons que, quand on a réuni les rayons rouges et les rayons violets, on n'a pas réuni les autres, qu'il est donc impossible d'obtenir un achromatisme complet et qu'il faut dès lors se préoccuper des portions du spectre qu'il est le plus convenable d'achromatiser. Enfin un dernier élément complique la question : c'est que les images directes sont elles-mêmes vues à l'aide d'un autre système optique, dont les effets propres viennent modifier ceux de la lentille elle-même.

On comprendra facilement, d'après ces explications, que la construction des lunettes et des microscopes achromatiques soit entourée de très-grandes difficultés ; ces difficultés sont telles, que dans le plus grand nombre des cas les constructeurs se bornent à reproduire des modèles auxquels on est arrivé par des essais empiriques. La détermination rigoureuse, *a priori*, des conditions qui caractérisent une lentille achromatique, ayant d'ailleurs les meilleures qualités possible à tous les points de vue, est une question extrêmement difficile, à cause de son caractère complexe.

764. Arc-en-ciel. — L'inégale réfrangibilité des rayons diversement colorés a permis à Newton de donner une théorie complète de l'arc-en-ciel, et de la confirmer par des mesures directes. On sait que ce magnifique phénomène s'observe lorsque des nuages se résolvent en pluie dans une région du ciel opposée à celle qu'occupe le soleil. L'observateur placé en face du nuage voit deux arcs concentriques et présentant les couleurs du spectre solaire. Dans l'arc intérieur, qui est ordinairement le plus brillant, le rouge est en haut et le violet en bas ; c'est l'inverse dans l'arc supérieur.

L'arc-en-ciel s'observe aussi sur les cascades éclairées par le soleil, à côté des jets ou pièces d'eau et en général dans toutes les circonstances où il se produit une grande pulvérisation du liquide.

Puisque le phénomène suppose la présence du soleil et qu'on ne peut en être témoin qu'autant qu'on tourne le dos à cet astre, on doit nécessairement l'attribuer à des rayons solaires qui, pénétrant dans une goutte d'eau, y subissent une ou plusieurs réflexions intérieures et reviennent à l'œil de l'observateur. La figure 695 représente un faisceau SI

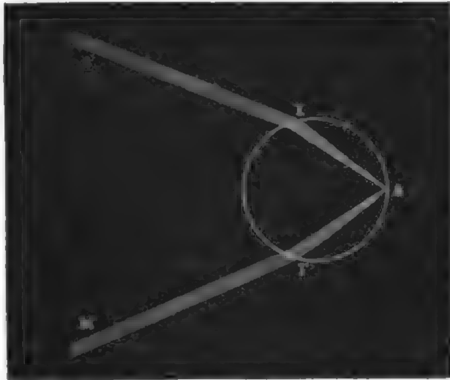


Fig. 695. — Réflexion produisant l'arc intérieur.

qui subit une réflexion en A et émerge suivant I'M. La figure 696 correspond au cas où le faisceau subit deux réflexions en A et en B. Or, après les réflexions intérieures, les réfractions à l'entrée et à la sortie, les rayons formant un faisceau parallèle en I, cessent d'être parallèles à la sortie en I'; ils forment alors un faisceau divergent, se disséminant dans l'espace suivant des directions tout à fait quelconques et ne pouvant donner lieu à aucune sensation précise et déterminée. Cela est vrai au moins pour la plupart des faisceaux; il en est toutefois qui échappent à cette conclusion : ce sont ceux qui tombent sur la goutte sous une incidence telle, que la déviation ait une valeur minima. Les variations dans le voisinage de toute valeur extrême étant naturellement très-petites, un petit faisceau parallèle SI formera aussi

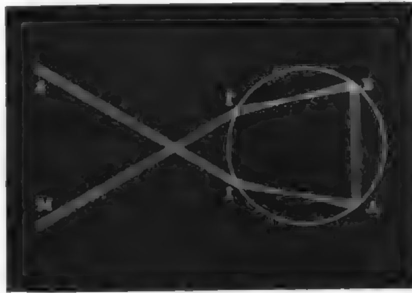


Fig. 696. — Double réflexion produisant l'arc extérieur.

à sa sortie un faisceau parallèle IM. Les rayons présentant cette particularité ont été appelés *rayons efficaces.*

L'angle qui correspond à l'efficacité dépend naturellement de l'indice de réfraction ; dans le cas d'une réflexion unique, cet angle est donné par la formule $\cos i = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}$. Si on met à la place de n la valeur $\frac{108}{81}$ qui est l'indice des rayons rouges dans l'eau, on en déduit $i = 59°22'$ et la déviation correspondante est de 42° 2'. Il suit de là que toutes les gouttes d'eau qui sont situées sur la surface d'un cône dont l'axe passerait par le soleil et l'œil O (fig. 697) de l'observateur, et dont le demi-angle serait égal à 42°2', enverront à cet observateur des rayons rouges efficaces et dessineront pour lui sur le ciel un arc lumineux rouge. Si dans la formule on remplace n par l'indice des rayons violets $\frac{109}{81}$, on trouve $i = 58°$, ce qui correspond à une déviation de 40° 17'. Le cône qui, ayant l'axe précédemment indiqué, aurait une demi-ouverture de 40°17', doit donc découper dans le ciel un arc dont tous les points enverront à l'observateur de la lumière violette. Entre ces deux se trouvent les arcs correspondants aux autres couleurs du spectre; on a donc un arc d'une largeur égale à 42° 2' — 40°17' = 1°45'. C'est l'arc intérieur dans lequel le rouge est évidemment en dehors et le violet en dedans de l'arc.

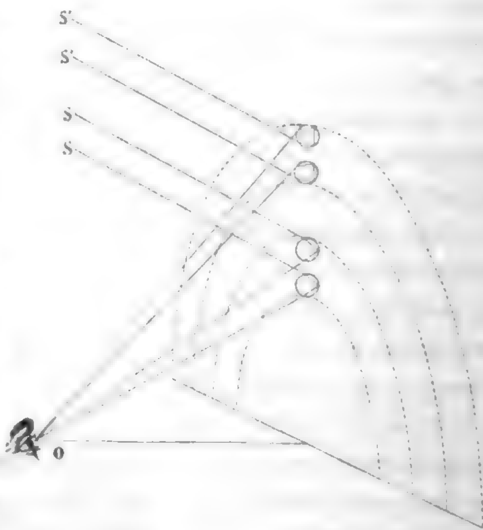


Fig. 697. — Théorie de l'arc-en-ciel.

Dans le cas de deux réflexions, la formule qui donne l'incidence relative à l'efficacité est $\cos i = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{8}}$. Pour les rayons rouges

i devient égal à 71°50′ pour une déviation de 50°58′. L'incidence pour les rayons violets est 71°26′ et la déviation 54° 9′; on en conclut l'existence d'un arc de 54°0′ — 50°58′ = 3°11′ de largeur, dans lequel le violet est en dessus; les deux arcs sont séparés par un arc de 50°58′ — 42°2′ = 8°56′. Ces différents nombres ont été confirmés par des mesures directes.

En supposant un plus grand nombre de réflexions, on obtiendrait la position d'autres arcs; mais jusqu'à présent on ne les a pas observés. Le calcul montre que le troisième et le quatrième sont situés entre l'observateur et le soleil, et ne peuvent donc qu'être noyés dans la lumière solaire. Le cinquième, placé du côté opposé au soleil, a, dit-on, été observé quelquefois dans les cascades.

En faisant tomber dans une chambre obscure des rayons solaires sur un jet d'eau, on a pu observer jusqu'au dix-septième arc et vérifier les conclusions de la théorie de Newton.

765. Moyen d'obtenir un spectre pur. — Le spectre solaire obtenu dans les conditions ordinaires est en réalité le résultat de la superposition des diverses images circulaires du soleil, dont chacune correspond à une couleur et à une réfrangibilité déterminées. On a cherché à isoler autant que possible dans le spectre les parties dues à chacune des parties constituantes. A cet effet, on a diminué les dimensions de l'ouverture par laquelle pénètre le faisceau solaire, en se servant d'une fente très-étroite et parallèle aux arêtes du prisme. Le faisceau, au sortir du prisme, est reçu sur une lentille achromatique. Celle-ci ramène à la convergence des rayons divergents qui, passant par un point de l'ouverture, iraient former après leur réfraction à travers le prisme une image colorée du soleil. Il se produira donc sur un écran convenablement placé une série d'images de l'ouverture en aussi grand nombre qu'il y a de rayons diversement colorés. Ces images empiètent encore les unes sur les autres, mais d'autant moins que l'ouverture est plus étroite, de sorte qu'en réduisant celle-ci autant que possible, on pourra avoir un spectre d'une remarquable pureté. Au lieu de regarder directement le spectre sur un écran, on pourrait le regarder à la loupe; mais on peut supprimer l'écran et observer l'image aérienne. Or la réunion de la lentille achromatique et de la loupe constitue une

lunette astronomique. Le procédé précédent consiste donc à recevoir le faisceau à sa sortie du prisme sur l'objectif d'une lunette et à observer le spectre avec l'oculaire de la lunette elle-même. C'est de cette façon qu'opérait Fraunhofer, célèbre opticien et savant de Munich.

766. Raies du spectre. — C'est par l'emploi de cette méthode que Fraunhofer fit, vers 1815, une découverte des plus importantes. Ayant observé le spectre d'un prisme de flint très-pur, il constata qu'il était sillonné dans toute son étendue de raies noires fines, parallèles, réparties d'ailleurs assez irrégulièrement. Il compta plus de 600 de ces raies et il en dessina 354 sur une carte du spectre qui est devenue classique. Ces raies ayant une position invariable constituent des points de repère précis pour la détermination des indices des diverses couleurs.

Dans la figure 1 de la planche III on a représenté les groupes principaux et caractéristiques des diverses régions, avec les lettres qui servent à les désigner.

767. Spectroscope. — La méthode d'exploration du spectre a reçu un perfectionnement important: il consiste à remplacer la fente pratiquée dans la paroi d'une chambre obscure par un collimateur, c'est-à-dire par une fente placée au foyer principal d'une lentille; de cette façon les rayons lumineux paraissent venir d'une fente infiniment éloignée. Le très-grand avantage de cette disposition, c'est que, le collimateur étant renfermé dans un tube, l'appareil d'observation devient portatif et peut s'installer où l'on veut : c'est ce que l'on nomme un *spectroscope*.

La figure 698 représente un spectroscope à un prisme. Il se compose d'un support sur lequel est placé un prisme recouvert d'un chapeau qu'on ne voit pas sur la figure. Le chapeau est percé de trois ouvertures vers lesquelles sont dirigés trois corps de lunettes. L'un d'eux appartient à la lunette d'observation du spectre. L'autre contient le collimateur, elle se termine vers le dehors par une fente étroite placée au foyer principal d'une lentille. Le troisième corps présente à son extrémité un micromètre divisé, éclairé par une bougie, et dans son intérieur une lentille destinée à donner l'image du micromètre. Cette image est renvoyée par réflexion dans la lunette. Il

résulte de cette disposition que si l'on met une flamme au-devant de la fente du collimateur, l'observateur qui regardera avec l'oculaire verra le spectre de la flamme et, projetée sur ce spectre, l'image



Fig. 698. — Spectroscope.

du micromètre qui permettra d'assigner la position exacte des raies. La figure représente le spectroscope à un prisme; on peut en augmenter beaucoup la puissance dispersive en associant plusieurs prismes.

768. Diverses radiations du spectre. — Le spectre solaire est formé par des radiations lumineuses dont l'éclat est variable d'un point à un autre; c'est entre les raies D et E, c'est-à-dire vers le milieu du jaune, que se trouve le maximum d'éclat.

En explorant le spectre à l'aide d'un petit thermomètre très-sensible ou d'une pile thermo-électrique, on trouve que l'élévation de température, sensible dans toute l'étendue visible, l'est encore bien au delà du rouge. Le maximum de température observé avec un

prisme de sel gemme se trouve même au delà des limites du spectre visible, à une petite distance du rouge.

Indépendamment du spectre lumineux et du spectre calorifique, il y a aussi un spectre chimique; c'est en effet l'action chimique de la lumière qui est la base de la photographie. Lorsque par les procédés ordinaires on fait une épreuve photographique du spectre, on remarque que l'action s'étend jusqu'au rouge exclusivement; les radiations de cette couleur ne paraissent donc pas propres à exciter les phénomènes chimiques. Mais cette action chimique existe chez des radiations qui vont bien au delà du violet. Lorsque l'on prend toutes les précautions nécessaires pour avoir un spectre pur, l'épreuve dans la partie lumineuse montre les raies de Fraunhofer: on trouve aussi des raies dans l'image du spectre ultra-violet; on a désigné les groupes principaux par les lettres H, L, M, N, O, P, qui font suite à celles qui ont été employées par Fraunhofer.

769. Radiations phosphorogéniques. — Il existe des substances qui, après une courte exposition à la lumière solaire, jouissent de la propriété d'émettre de la lumière pendant un temps plus ou moins long, sans que leur température s'élève d'une manière notable. Ces substances portent le nom de substances phosphorescentes. Le sulfure de calcium (phosphore de Canton), le sulfure de baryum (phosphore de Bologne), etc., sont connus depuis longtemps par cette circonstance. Toutes les radiations du spectre ne paraissent pas propres à développer la phosphorescence; il est facile de constater que cette faculté réside plus particulièrement dans les rayons ultra-violets.

La phosphorescence est une propriété beaucoup plus fréquente qu'on ne serait porté à le croire d'après les observations ordinaires; c'est que chez un très-grand nombre de corps la phosphorescence ne dure que quelques instants après la fin de l'insolation. M. Edmond Becquerel a fait connaître, sous le nom de *phosphoroscope*, un instrument très-ingénieux à l'aide duquel on peut constater la phosphorescence, même quand elle a une très-courte durée. Il se compose (fig. 699 et 700) de deux disques percés de quatre ouvertures dans des positions rectangulaires; ces ouvertures ne se correspondent pas, de sorte qu'en face de l'espace vide de l'un d'eux corres-

pond un espace plein de l'autre. Les deux disques sont montés sur le même axe et peuvent recevoir d'un rouage convenable un mouvement de rotation extrêmement rapide. Le corps dont on veut étudier la phosphorescence est placé entre les deux disques dans

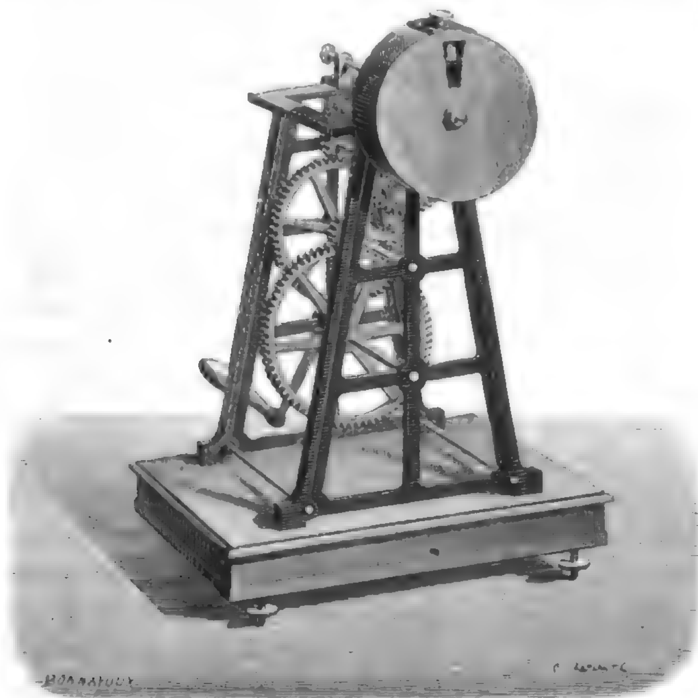


Fig. 699. — Phosphoroscope.

une position invariable. L'appareil étant placé dans une chambre obscure, on le dispose en face d'un volet, par lequel on fait entrer un faisceau solaire, à la hauteur du point où se trouve le corps, et l'observateur se place du côté opposé, derrière un écran percé d'une ouverture à la même hauteur. Lorsque le faisceau atteint le corps, c'est qu'il passe par une ouverture, et il est, par conséquent, arrêté par le plein du disque suivant. Par la rotation le corps peut être aperçu par l'observateur, car un vide du second disque vient se présenter devant son œil; mais alors le corps ne reçoit pas de lumière, et s'il est visible, c'est grâce à la phosphorescence qu'il possède. On reconnaît ainsi que presque tous les corps sont phos-

phorescents; seulement pour quelques-uns d'entre eux la phosphorescence ne dure pas plus de $\frac{1}{10000}$ de seconde.

La fluorescence dont il a été question au § 618 est une phosphorescence qui cesse au moment même où cesse la lumière. Ainsi, si dans la partie ultra-violette du spectre on trace des traits avec le sulfate de quinine, ceux-ci deviennent brillants et visibles. En imprégnant la totalité du champ du spectre ultra-violet avec le sulfate de quinine, on rendra tout le spectre visible, sauf certaines lignes qui sont précisément les raies du spectre ultra-violet.

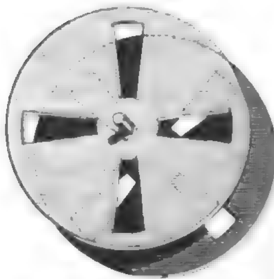


Fig. 700. — Disque du phosphoroscope.

770. Différentes sortes de spectres. — En étudiant au spectroscope les spectres de diverses origines, on a été conduit à les classer suivant différents types :

1° Le spectre solaire de Fraunhofer, caractérisé par des raies noires. Le spectre de la lune et des planètes présente les mêmes raies caractéristiques, ce qui est tout naturel, puisque ces corps ne font que réfléchir la lumière solaire. Le spectre des étoiles présente aussi des raies noires, mais autrement disposées que celles de la lumière solaire.

2° Le spectre des solides et liquides incandescents. Ces spectres sont tout à fait continus ; ils ne présentent aucune solution de continuité, ce qui veut dire qu'ils renferment les rayons lumineux de toutes les réfrangibilités, depuis l'extrême rouge jusqu'à l'extrême violet.

3° Les flammes dans lesquelles ne se trouve en suspension aucune particule solide, c'est-à-dire les gaz incandescents, donnent un spectre discontinu et formé d'un nombre limité de bandes lumineuses. La continuité des spectres que l'on obtient avec la flamme d'une bougie, d'une lampe, d'un bec de gaz, tient uniquement aux particules de charbon contenues dans la flamme et qui donnent le spectre du charbon incandescent. Mais si dans le bec de gaz on fait arriver un excès d'air, la décomposition du combustible n'a pas

lieu; il n'y a plus de particules dans la flamme, et le spectre devient discontinu. Cette lumière spéciale du gaz brûlant avec un excès d'air porte le nom de *lumière de Bunsen*.

4° Le spectre de l'arc voltaïque est formé par un grand nombre de bandes brillantes, auxquelles viennent se superposer celles qui caractérisent la nature chimique des électrodes qui se volatilisent sous l'action de la chaleur produite.

Dans un gaz très-raréfié, l'étincelle de la bobine donne un spectre discontinu dont la disposition propre caractérise le gaz lui-même.

771. Analyse spectrale. — On fait brûler la lampe à gaz placée devant le collimateur du spectroscope avec un excès d'air ; on obtient ainsi un spectre à peine visible. Si alors, à l'aide d'un fil de platine, porté par un petit support, on introduit dans la flamme une petite quantité d'un sel métallique, la matière se volatilise dans la flamme et on voit aussitôt apparaître des bandes brillantes caractéristiques et qui définissent la nature propre de la substance. La planche III représente au-dessous du spectre de Fraunhofer les spectres de différents métaux, celui du phosphore, de l'hydrogène, etc., de manière à pouvoir établir la correspondance des diverses raies.

La présence de ces raies caractéristiques des diverses substances a été signalée depuis longtemps, mais ce n'est que bien plus récemment, et à la suite d'un très-beau travail de Bunsen et Kirchhoff sur ce point, qu'on en a tiré parti pour l'analyse qualitative. Ce procédé est d'une sensibilité extrême, et, quoique connu depuis un petit nombre d'années seulement, il a déjà donné lieu à la découverte de quatre nouveaux métaux : le *césium*, le *rubidium*, le *thallium* et l'*indium*.

772. Renversement des raies. — Analyse chimique de l'atmosphère solaire. — Il peut paraître surprenant que, tandis que les solides et les liquides incandescents à la surface du globe donnent un spectre continu renfermant tous les rayons possibles, le spectre solaire présente des solutions de continuité accusant l'absence de certains rayons. Il est assez naturel de supposer, et cette hypothèse a été faite il y a fort longtemps, que cette absence

a pour cause une absorption. Mais où et dans quelles circonstances cette absorption se produit-elle? C'est ce qu'il a été, jusqu'aux travaux de MM. Bunsen et Kirchhoff, impossible d'affirmer d'une façon rationnelle. Une observation faite pour la première fois par Foucault, et répétée ensuite d'une manière générale par les observateurs précédemment nommés, permet d'établir à ce sujet une théorie plausible.

Si l'on fait passer sur une flamme donnant un spectre métallique à raies brillantes la lumière d'un solide incandescent à spectre continu, on voit dans le spectre de ce dernier les raies brillantes de la flamme se changer en raies obscures. En d'autres termes, une flamme qui émet pour son compte des rayons d'une certaine réfrangibilité est capable d'absorber ces mêmes rayons provenant d'une autre source. Dès lors l'origine des raies de Fraunhofer paraît évidente. On peut supposer, en effet, que le noyau solaire est formé par un solide ou un liquide incandescent qui donnerait un spectre continu, mais certaines de ces radiations sont absorbées par l'atmosphère solaire, et de là viennent les raies noires du spectre.

On peut aller plus loin : si l'on constate, par exemple, que certaines raies brillantes des spectres métalliques sont en coïncidence *exacte* avec des raies noires déterminées de Fraunhofer, on devra en conclure que c'est à la vapeur de ce métal que l'absorption est due, et que par conséquent ce métal, à l'état de vapeur, existe dans l'atmosphère solaire, et qu'il fait partie de la constitution chimique du soleil.

D'après les expériences faites jusqu'à présent, on peut conclure qu'il y a dans le soleil les substances suivantes : *potassium, sodium, calcium, baryum, magnésium, zinc, fer, chrome, cobalt, nickel, cuivre.*

Ajoutons que, lors de la dernière éclipse totale de soleil visible le 18 août 1868, on a pu faire l'étude spectrale des protubérances, et on a reconnu qu'elles donnaient lieu à un spectre discontinu, ce qui établit leur nature gazeuse. On a trouvé de plus que trois de ces raies sont précisément celles de l'hydrogène, ce qui donne une certaine consistance à l'hypothèse que ce gaz entre dans la composition des protubérances et de l'atmosphère solaires.

CHAPITRE LXII.

VISION ET INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

773. Description de l'œil. — L'œil de l'homme (fig. 701) est formé d'un globe à peu près sphérique enchâssé dans les cavités orbitaires. L'enveloppe extérieure H est formée par une membrane

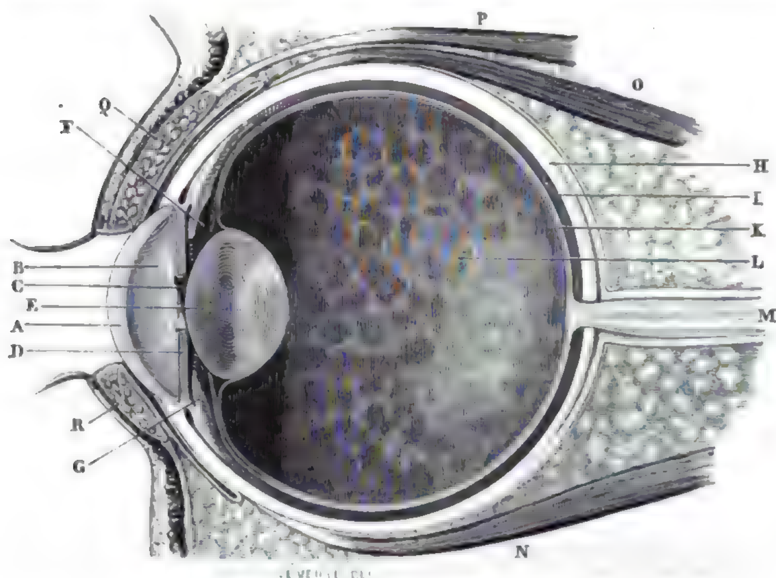


Fig. 701. — Œil de l'homme.

opaque et résistante appelée *sclérotique* ou *cornée opaque*. Sur la partie antérieure, une portion A de la cornée devient transparente : c'est la *cornée transparente*. Derrière la cornée transparente se trouve une cloison musculaire et contractile P appelée *iris;* elle est diver-

sement colorée, suivant les cas; c'est à elle qu'est due la couleur des yeux. L'iris est percé en son centre d'une ouverture appelée *pupille,* par laquelle les rayons lumineux venus de l'extérieur peuvent pénétrer dans l'intérieur de l'œil. Derrière la pupille est le *cristallin* E, corps transparent, ayant à peu près la forme d'une lentille dont la face antérieure a une courbure moins prononcée que la face postérieure. La portion de l'œil comprise entre le cristallin et la cornée transparente porte le nom de chambre antérieure; elle est remplie d'un liquide d'une densité peu différente de celle de l'eau et qu'on désigne sous le nom d'humeur aqueuse. La partie L, située derrière le cristallin, est la chambre postérieure; elle est remplie d'un liquide de consistance gélatineuse, contenu dans l'intérieur d'une membrane très-mince; c'est le *corps vitré* ou l'*humeur vitrée.* La chambre postérieure est tapissée par une membrane noire appelée *choroïde.* Sur la choroïde s'étale la *rétine* K, qui n'est autre chose que l'épanouissement du nerf optique M et qui est destinée à recevoir l'impression lumineuse.

774. Mécanisme de la vision. — Il résulte clairement de cette description que si un pinceau lumineux, provenant d'un point extérieur, pénètre dans l'œil, il éprouvera une série de réfractions qui auront pour effet de le rendre convergent, car le cristallin ayant un indice de réfraction supérieur aux deux milieux entre lesquels il se trouve (voir le tableau, page 908), toutes les réfractions ont lieu dans le même sens[1]. Il se formera donc quelque part une image réelle et renversée d'un objet placé à l'extérieur. Si cette image se forme sur la rétine, la vision a lieu; elle est nette si l'image est nette, elle est confuse si l'image est confuse. En d'autres termes, la formation sur la rétine de l'image nette des objets extérieurs est la condition physique essentielle de la vision.

Il ne nous est pas possible de découvrir la façon dont le phénomène physique de l'image se transforme en sensation; toutefois on comprend que, puisque la rétine est l'intermédiaire de cette sensation, il faut que l'image soit nette, car à cette condition seule un

1. Il résulte de cette particularité que l'œil n'est pas achromatique. Ce défaut, peu sensible dans les cas ordinaires, le devient beaucoup lorsqu'il s'agit d'objets très-déliés et très-vivement éclairés.

point particulier de la rétine sera exclusivement impressionné par un point extérieur.

L'ensemble des réfractions éprouvées successivement dans l'intérieur de l'œil est en réalité équivalent à la réfraction unique que ferait éprouver un cristallin un peu différent du cristallin réel ; on peut donc assimiler l'expérience de la vision à celle même de la chambre obscure, et considérer pour la formation des images un centre optique placé dans l'épaisseur même du cristallin. Cette conclusion a d'ailleurs été vérifiée directement par l'expérience.

775. Distance de la vision distincte. — L'indication théorique précédente, prise à la lettre, conduirait à une conséquence directement contraire à l'expérience. En effet, comme la distance de la rétine au centre optique est invariable, il n'y aurait que des points situés à une distance déterminée de l'œil qui pussent former une image nette et par suite être distinctement aperçus. Or tout le monde sait que l'œil peut apercevoir distinctement des objets placés à des distances quelconques, au delà d'une certaine limite. Si l'on prend, par exemple, un dessin formé de détails déliés et délicats, chaque personne trouvera une position pour laquelle ces détails seront le plus nettement distingués. Si, à partir de cette position, on éloigne le carton, la vue ne cesse pas d'être nette, c'est-à-dire qu'il n'y a aucun trouble dans la vision, mais la séparation des détails devient de plus en plus difficile, et il arrive un moment où l'on n'aperçoit plus qu'un fond uniformément éclairé. Si on fait mouvoir le carton en sens contraire, en le rapprochant de l'œil, la vision devient de moins en moins *ferme* ; il y a conscience d'un effort intérieur, et enfin on atteint un point à partir duquel toute vision distincte est impossible. Il y a donc pour chaque personne une limite inférieure de la vision distincte. Quand l'œil est normal, cette limite paraît être de quinze centimètres ; elle est beaucoup plus petite chez les myopes, plus grande chez les presbytes. Au delà de cette limite, la vision reste distincte quelle que soit la distance des objets, à l'exception des myopes, chez lesquels la vision distincte est comprise entre des limites souvent très-étroites. On admet assez généralement que, dans l'œil organisé à la manière normale, l'effort intérieur dont il vient d'être question plus haut cesse à la distance de trente centi-

mètres. C'est cette distance qu'on appelle plus particulièrement la distance de la *vision distincte;* mais il est important de remarquer qu'il n'y a pas de distance unique qui doive porter ce nom, et qu'il y a toujours des distances très-diverses pour lesquelles la vision peut être distincte.

Pour les objets qui sont placés à une distance considérable de l'œil, les propriétés ordinaires des lentilles permettent de se rendre compte de ces particularités. Il résulte en effet de la théorie que, quand l'objet est très-notablement au delà du double de la distance principale, le foyer se fait dans le voisinage du foyer principal, et des variations considérables dans la position de l'objet ne correspondent qu'à des variations insignifiantes dans celle de l'image. Mais lorsqu'il s'agit d'objets rapprochés de l'œil, il faut nécessairement admettre qu'il se produit une accommodation de l'œil, destinée à amener l'image sur la rétine. L'effort incontestable qui accompagne la vision des objets rapprochés en est sans doute le signe. Cette accommodation de l'œil, longtemps niée, a été mise en évidence d'une façon absolue. On a pu constater, en effet, que l'image d'une bougie, formée par réflexion à la surface antérieure du cristallin, se déplace très-sensiblement quand l'œil regarde des objets différemment éloignés et de façon à accuser un accroissement de courbure quand les objets se rapprochent.

776. Rôle des deux yeux dans la vision. — La vision peut incontestablement se faire avec un œil unique ; il est donc tout naturel de rechercher quelle est l'utilité des deux yeux, quel rôle ils jouent dans la vision. On comprend d'abord très-aisément comment, bien qu'il y ait deux images formées sur les deux rétines, l'œil ne voit en réalité qu'un objet. C'est une conséquence pure et simple de l'éducation de l'organe, qui s'habitue à une sensation unique lorsque des points *correspondants* des rétines sont impressionnés. Si l'on vient à appuyer le doigt sur le globe de l'œil, les points impressionnés sur les deux rétines ne sont plus correspondants et la vision est double.

Quant au rôle des deux yeux dans la vision ordinaire, il consiste dans l'appréciation des distances. Si, en effet, on dirige les deux axes visuels vers un point extérieur, l'angle formé par ces

deux axes sera d'autant plus grand que le point sera plus rapproché, et réciproquement. La conscience de la valeur de cet angle intervient dans l'appréciation de la distance. Il est très-facile de remarquer que cette appréciation devient incertaine quand on ferme l'un des deux yeux. Lorsqu'une personne, par suite d'un accident, se trouve privée momentanément de l'usage de l'un de ses yeux, elle commet une foule de maladresses qui s'expliquent par l'incertitude de l'appréciation des distances.

A mesure que les objets s'éloignent, l'angle des deux axes visuels devient de plus en plus petit, ses variations sont insensibles, et l'appréciation de la distance devient impossible. Aussi, dès qu'ils sont un peu éloignés de nous, tous les objets paraissent en être à la même distance.

777. Vision binoculaire. — Stéréoscope. — Cette appréciation de la distance est évidemment un des éléments de la sensation



Fig. 702.

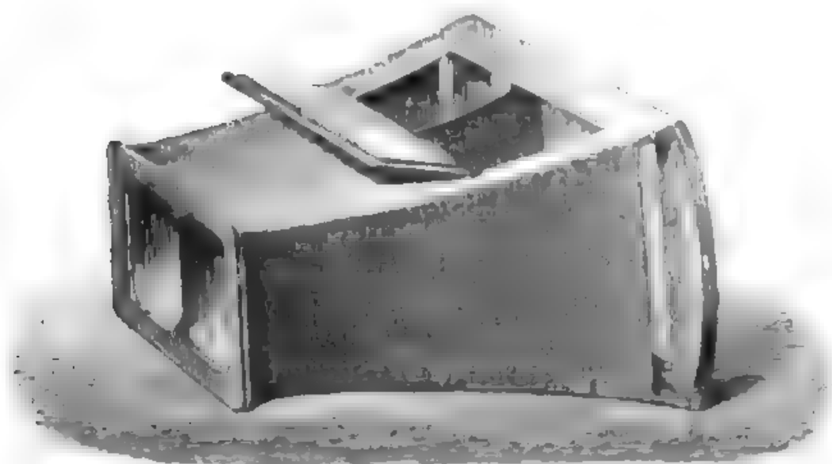


Fig. 703. — Stéréoscope.



Fig. 704. — Marche des rayons dans le stéréoscope.

du relief. Mais cette sensation paraît tenir aussi à un phénomène d'une autre nature. Lorsque nous examinons des objets peu distants de l'œil, les images formées sur les deux rétines ne sont pas tout à fait pareilles; il y a, en effet, des points que l'œil droit peut apercevoir, et qui sont invisibles pour l'œil gauche, et réciproquement. Si, par exemple, on regarde le dé représenté par la figure 702 avec l'œil droit, on apercevra une perspective de la face

de droite, et la face de gauche sera invisible ; le contraire aura lieu si l'on examine avec l'œil gauche. Suivant M. Wheatstone, c'est à la combinaison de ces deux images dissymétriques qu'est précisément due la sensation du relief. Cette ingénieuse théorie est confirmée par les effets d'un instrument connu de tous aujourd'hui sous le nom de *stéréoscope* (fig. 703). Au fond d'une boîte divisée en deux compartiments par une cloison longitudinale on place deux dessins représentant, l'un l'image droite, l'autre l'image gauche d'un objet en relief; sur la face antérieure de la boîte sont disposés deux prismes, ou plus exactement deux demi-lentilles qui donnent aux rayons lumineux, comme le montre la figure 704, la même direction que s'ils venaient de l'objet; l'œil croit apercevoir l'objet lui-même avec un relief très-sensible.

Le relief stéréoscopique est extrêmement marqué ; il constitue une sensation propre et très-distincte de celle à laquelle donne toujours lieu une perspective exacte. Ainsi, lorsqu'on regarde dans le stéréoscope *avec un seul œil* une épreuve photographique, on éprouve une certaine sensation de relief résultant de la perspective. C'est ce genre de sensation que produisent les décors de théâtre bien exécutés, les dioramas, ou même les appareils appelés *optiques*, et où on regarde à l'aide de verres grossissants des dessins en perspective. Si alors on vient à ouvrir l'autre œil, une sorte de mouvement se produit dans l'image, dont le relief se prononce et se fixe d'une façon très-curieuse.

Ce sont ordinairement des épreuves photographiques que l'on place dans le stéréoscope ; pour les obtenir, on se sert d'une chambre munie de deux objectifs qui jouent le rôle, l'un de l'œil droit, l'autre de l'œil gauche. On dirige l'axe de l'instrument vers la portion centrale de l'objet à reproduire.

Le stéréoscope a été imaginé par M. Wheatstone, mais le modèle connu du public est une modification de l'instrument primitif due à M. Brewster.

778. Instruments d'optique. — Dans le sens littéral du mot on peut appeler instruments d'optique tous les instruments, de quelque nature qu'ils soient, dans lesquels on met en évidence ou on utilise une propriété quelconque des rayons lumineux ; mais

dans la pratique on a réservé ce mot pour les instruments qui deviennent les auxiliaires de l'organe de la vision, suppléent à ses imperfections et dans tous les cas en accroissent la puissance. Ces instruments forment quatre groupes : les BESICLES, les MICROSCOPES, les LUNETTES et les TÉLESCOPES; nous allons les étudier successivement,

779. Besicles. — Les besicles sont destinées à remédier aux défauts de la vue connus sous le nom de *presbytie* et *myopie*.

Besicles des presbytes. — La presbytie est un effet ordinaire de l'âge, et peu de personnes y échappent. Chez les presbytes, la limite inférieure de la vision distincte étant plus grande que la limite normale, il arrive généralement que des caractères d'imprimerie de grandeur moyenne, placés à la distance de 30 centimètres, cessent d'être aperçus distinctement. On obvie à ce grave inconvénient en diminuant la divergence des rayons qui arrivent à l'œil, par l'interposition d'un verre convexe (fig. 705). On voit que si des rayons lumineux partent du point A, après leur réfraction sur la lentille, le point de concours se trouve reporté en A', à une distance plus considérable de l'œil, et qui peut être plus favorable pour la vision distincte du presbyte.

Les opticiens distinguent ordinairement par des numéros les différents verres des lunettes; ces numéros représentent la grandeur

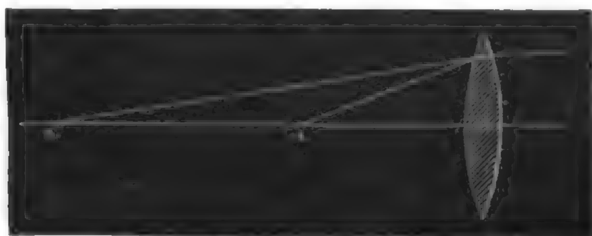


Fig. 705. — Verre de presbyte.

de la distance focale exprimée en pouces; ainsi le numéro 16 caractérise un verre dont la distance focale est égale à 16 pouces. Lorsqu'un presbyte peut assigner la position du point A', qui lui permet de lire facilement, il est très-aisé de calculer le numéro du verre qui lui convient pour pouvoir lire à la distance de 30 centimètres. Supposons, en effet, que A' soit placé à 45 centimètres

de l'œil, les points A et A' sont des foyers conjugués par rapport à la lentille; on a donc, en appliquant la formule ordinaire, désignant par x le numéro cherché, et remarquant qu'ici, le foyer conjugué étant virtuel, on doit changer le signe de p',

$$\frac{1}{30} - \frac{1}{45} = \frac{1}{x}.$$

On tire de cette équation 90 centimètres pour la valeur de x, ou, en pouces, 38; c'est le numéro du verre qu'il convient de choisir.

Il n'arrive pas toujours qu'on puisse assigner la distance à laquelle la lecture peut se faire distinctement. A mesure, en effet, que cette distance s'éloigne, le diamètre apparent des caractères diminue; l'organe de la vue perd d'ailleurs de sa force et de sa sensibilité à mesure que la presbytie fait des progrès, et les verres convergents très-forts qu'emploient quelques vieillards agissent un peu à la façon de la loupe, en augmentant le diamètre apparent des objets et les rendant plus facilement perceptibles.

Myopes. — Chez les myopes, la distance de la vision distincte est comprise entre des limites très-étroites, et la limite supérieure de cette vision est encore souvent beaucoup plus petite que 30 centimètres, de sorte que la lecture devient incommode. On se sert alors d'un verre concave disposé de telle façon que les rayons partis d'un point A placé à la distance ordinaire et rendus divergents par le verre placé au-devant de l'œil paraissent venir d'un point A', situé dans les limites de la vision distincte du myope ou mieux à la limite inférieure de cette vision.

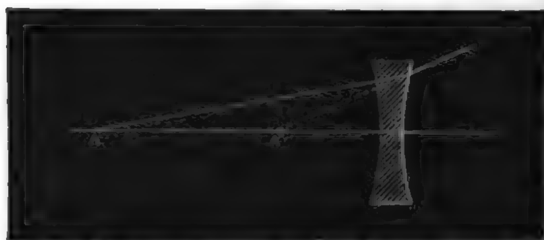


Fig. 706. — Verre de myope.

On peut, dans ce cas comme dans celui de la presbytie, calculer le numéro du verre qui convient. Supposons le point A' à

15 centimètres, appliquons la formule des lentilles en remarquant encore que p' doit être négatif, nous aurons

$$\frac{1}{30} - \frac{1}{15} = -\frac{1}{x}.$$

d'où $x = 30$, ou en pouces $x = 11$. C'est le numéro cherché.

Remarquons que le verre divergent placé devant l'œil du myope n'a pas seulement pour effet de ramener dans les limites de la vision distincte les objets placés à une distance déterminée, mais tous les objets placés au delà, dans une certaine étendue. Si l'on place devant l'œil un verre dont la distance focale soit précisément égale à la limite supérieure de la vision, le myope verra distinctement tous les objets placés aussi loin que possible, de la même façon que cela a lieu pour une personne dont la vision est normale.

780. Loupe ou microscope simple.— La loupe est constituée simplement par un verre convexe derrière lequel on place un objet *a b*, situé à une distance plus petite que la distance focale principale. D'après ce qui a été expliqué au § 745, il se forme une image virtuelle agrandie AB; si l'on fait varier la position de l'objet *ab* de façon que cette image se fasse à la distance de la vision distincte, on pourra substituer à la vision de l'objet celle de l'image et profiter ainsi, pour l'étude de l'objet lui-même, de l'agrandissement produit par la réfraction.

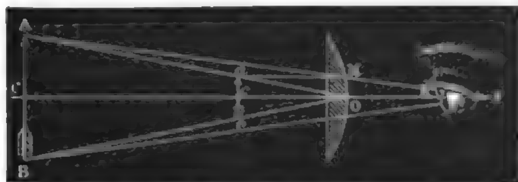


Fig. 707. — Loupe.

La figure montre la construction de l'image par le procédé que nous avons plusieurs fois employé. Par le point *a* on mène un rayon parallèle à l'axe qui donne un rayon réfracté MF passant par le foyer ; l'intersection avec l'axe optique *a*O détermine le point A. Le point B s'obtient par une construction analogue.

Point où il faut placer l'objet. — Pour que l'image soit nettement aperçue, il faut que la distance KC soit égale à la distance de la vi-

sion distincte ; il en résulte nécessairement une position déterminée de l'objet *ab* qu'il est facile de calculer. Les deux points *c* et C sont en effet des foyers conjugués, auxquels on peut appliquer la formule ordinaire ; ce qui donne, en changeant le signe de p', puisque le foyer est virtuel,

$$\frac{1}{Oc} - \frac{1}{OC} = \frac{1}{f},$$

d'où on tire

$$Oc = \frac{f.OC}{f+OC}.$$

Mais en appelant D la distance de la vision distincte et a la distance de l'œil à la loupe, on a $OC = D - a$, ce qui donne pour la valeur de O*c*

$$Oc = \frac{f(D-a)}{f+D-a}.$$

On voit que cette quantité diffère très-peu de f, particulièrement quand cette quantité est très-petite, c'est-à-dire quand la lentille est à très-court foyer. Si, en effet, dans le dénominateur on néglige f devant $D - a$, la valeur de O*c* se réduit à f.

Remarque sur la limite de la vision distincte. — Si, dans la formule précédente, on met à la place de D la limite inférieure de la vision distincte, qui est en effet la plus favorable pour l'observation des détails de l'objet, on trouvera pour O*c* une certaine quantité, qui est la limite des positions où on peut placer l'objet. Il est évident que le foyer constitue une autre limite, pour laquelle l'image serait à l'infini. On voit que l'intervalle entre ces deux limites est très-étroit, et c'est là l'explication d'un fait qui semble constituer une contradiction avec ce que l'on connaît de la vision, et qui est applicable d'ailleurs à tous les instruments d'optique. Ainsi, tandis qu'au delà d'une certaine limite inférieure l'œil normal voit nettement à toutes les distances, dans les instruments d'optique, pour peu que l'objet s'écarte dans un sens ou dans un autre de ce qu'on appelle le *point*, la vision devient confuse. On voit par ce qui précède que, pour que l'œil voie nettement, il faut que l'image soit comprise entre l'infini et la distance inférieure de la vision distincte ; or cela

correspond à une variation très-petite de la position de l'objet, variation qu'il serait d'ailleurs facile de calculer séparément dans chaque instrument d'optique en particulier.

Grossissement. — On appelle *grossissement* le rapport du diamètre apparent de l'image au diamètre apparent de l'objet, celui-ci étant placé dans les meilleures conditions pour être vu directement. Or, puisque par hypothèse AB est à la distance de la *meilleure vision distincte,* c'est à cette distance qu'il faudrait placer l'objet pour le bien voir. L'image et l'objet étant placés alors à la même distance, le grossissement est évidemment égal au rapport de leurs dimensions, c'est-à-dire à $\frac{AB}{ab}$, ou, d'après les triangles semblables AOB, aOb, à $\frac{CO}{cO}$. D'après la valeur précédemment trouvée, ce rapport est égal à

$$D - a : \frac{f(D - a)}{f + D - a} = \frac{f + D - a}{f}$$

Si, comme on le fait très-souvent, on néglige f et a devant la distance D qui est toujours d'un assez grand nombre de centimètres, le grossissement se réduit simplement à $\frac{D}{f}$, expression qui se déduit immédiatement de la figure dans ces conditions d'approximation, puisque dans ce cas OC est considéré comme égal à D et Oc comme égal à f. Si on néglige seulement a sans négliger f devant D, la formule devient

$$\frac{D + f}{f} = 1 + \frac{D}{f}.$$

On voit d'après ces formules que le grossissement est d'autant plus grand que le foyer est plus court et la vue distincte plus longue. Cette seconde proposition paraît en contradiction avec l'expérience, car c'est un fait notoire que les myopes ont plus d'avantage à se servir de la loupe que les presbytes. Cette contradiction apparente tient à ce que dans l'usage qu'on fait de cet instrument on ne compare pas précisément l'objet à son image dans les conditions qui viennent d'être indiquées ; mais on regarde un objet de *grandeur déterminée,* par exemple les divisions d'un vernier ou d'un

micromètre. L'agrandissement du diamètre apparent est alors le quotient du grossissement proprement dit par la distance de la vision distincte, et l'on voit aisément que ce quotient est plus grand pour les myopes que pour les presbytes.

Microscope simple. — On donne ordinairement le nom de *microscope simple* à une loupe qui est montée de façon à faciliter l'observation méthodique des objets. La figure 708 représente un instrument de ce genre. La loupe, disposée dans une monture en cuivre, est en *l*; on peut l'élever ou l'abaisser par le jeu du bouton V qui met en mouvement la crémaillère *a*. C' est le porte-objet, et, en un certain point du support *b*, on dispose un miroir légèrement concave M, à l'aide duquel on éclaire l'objet de façon à rendre son image plus lumineuse et par conséquent plus facile à étudier.

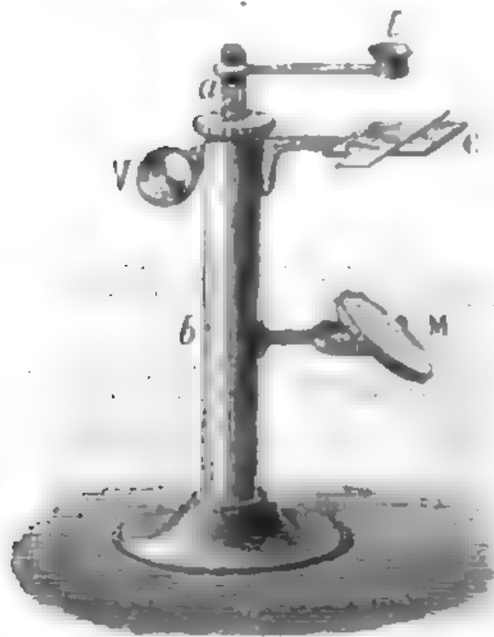


Fig. 708. — Microscope simple.

Loupe composée. — La formule du grossissement nous montre que, pour avoir un grossissement considérable, il faut diminuer la courbure des lentilles; mais, d'autre part, les aberrations de sphéricité augmentant très-rapidement quand la courbure diminue, dès qu'on s'éloigne un peu de la direction de l'axe, les images deviennent mauvaises. D'ailleurs une petite lentille ne pouvant naturellement recevoir que très-peu de lumière, les images sont peu éclairées. On élude ces inconvénients en se servant de deux verres convexes, dont l'ensemble agit comme un verre de foyer plus petit; mais chacun d'eux peut avoir une étendue en rapport avec la courbure des sphères qui le limitent. C'est ce que l'on appelle une *loupe composée.* Le premier verre considéré isolément donnerait lieu à une image, laquelle considérée comme objet donnerait lieu par le second verre à l'image définitive.

On emploie souvent ce système particulier comme *oculaire* dans divers instruments d'optique; sa théorie exacte, sans présenter de difficultés véritables, dépasse toutefois les limites naturelles de ce traité. Nous nous bornerons à remarquer que l'expé-

rience et la théorie montrent qu'il y a avantage à se servir de ménisques plan-convexes dont les parties courbes se regardent. Lorsque, les distances focales des deux lentilles étant les mêmes, la distance qui les sépare est égale aux $\frac{2}{3}$ de cette distance, le système prend le nom d'*oculaire de Ramsden* ou oculaire positif.

781. Microscope composé. — Le microscope composé consiste essentiellement en une lentille O appelée *objectif*, placée à l'une des extrémités d'un tube et en une autre lentille O' appelée *oculaire*, qui sert à regarder l'image réelle d'un objet formée par la première. L'objet *ab* est placé derrière l'objectif, entre la distance focale principale et le double de cette distance, l'image réelle *a' b'* est agrandie. Si elle se forme à une distance convenable de l'oculaire, celui-ci permettra de voir l'image virtuelle AB formée à la distance de la vision distincte. Il y a donc ici deux grossissements successifs, celui de l'objectif et celui de l'oculaire : de là le nom de microscope composé donné à l'instrument.



Fig. 709. — Microscope composé.

Grossissement. — Un raisonnement semblable à celui qui a été employé à propos de la loupe montre que le grossissement est égal au rapport $\frac{AB}{ab}$. Or ce rapport est égal à $\frac{AB}{a_1b_1} \cdot \frac{a_1b_1}{a\,b}$. Le premier facteur représente le grossissement de l'objectif, le second celui de l'oculaire, d'où on voit que le grossissement total de l'instrument est égal au produit du grossissement de l'objectif par celui de l'oculaire, ce qui est d'ailleurs évident *a priori*.

Le grossissement de l'oculaire, dans le cas où celui-ci est formé par une simple loupe, est connu, et égal à $1 + \frac{D}{f}$; il suffit donc de multiplier cette quantité par le grossissement de l'objectif.

Le grossissement de l'objectif se mesure directement de la manière suivante :

A l'endroit où se forme l'image réelle de l'objet se trouve un diaphragme dont le diamètre est connu. Ce diaphragme sert d'ailleurs à limiter le champ de l'instrument et à ne laisser arriver sur l'oculaire que les faisceaux qui sont peu obliques. Supposons qu'on place sur le porte-objet un micromètre formé d'un millimètre divisé en 100 parties égales; on apercevra l'image de cet objet limitée par le diaphragme; soit n le nombre de divisions qu'on peut y compter, chacune d'elles a pour longueur $\frac{1}{100}$ de millimètre, et par suite la longueur réelle de l'objet dont on voit l'image est, en prenant le millimètre pour unité, $\frac{n}{100}$. D'autre part, la longueur de l'image est exactement le diamètre M du diaphragme, exprimé en millimètres; le grossissement de l'objectif est donc $M : \frac{n}{100} = \frac{100\,M}{n}$ et, par suite, le grossissement total est $\frac{100\,M}{n}\left(1 + \frac{D}{f}\right)$. Comme on ne se sert pas ordinairement d'un oculaire simple, mais bien d'un oculaire composé analogue à celui qui a été décrit dans le paragraphe précédent, le second facteur doit être remplacé par la valeur du grossissement dans l'oculaire particulier dont on se sert.



Fig. 710.
Mesure du grossissement.

Mesure directe du grossissement. — On peut, du reste, d'une façon empirique, déterminer le grossissement total par une expérience directe. On place, à cet effet, au-dessus de l'oculaire un miroir incliné et percé d'un trou à son centre. A côté se trouve un prisme rectangle dont l'hypoténuse réfléchit totalement l'image d'une règle divisée; de cette façon l'œil voit dans le champ du microscope l'image de la règle. Il suffit,

par conséquent, de prendre pour objet le micromètre pour savoir le nombre de divisions de la règle qui sont couvertes par un nombre déterminé de divisions du micromètre. Si, par exemple, n divisions du micromètre couvrent N divisions de la règle divisée en millimètres, le grossissement est égal à

$$N : \frac{n}{100} = \frac{100 \cdot N}{n}.$$

Emploi de l'oculaire négatif. — On emploie comme oculaire tantôt l'oculaire positif décrit dans le paragraphe précédent, tantôt un oculaire composé aussi de deux verres convexes, mais différant de celui de Ramsden en ce que le premier se trouve plus rapproché de l'objectif que l'endroit où se formerait l'image réelle de l'objet; celle-ci se formerait directement dans l'intervalle des deux verres. A raison de cette circonstance on a donné à cet oculaire le nom d'oculaire négatif. Huyghens, qui le premier en a proposé l'emploi, le destinait à la correction des effets de la dispersion. Bien qu'aujourd'hui on se serve d'objectifs achromatiques, comme cet achromatisme n'est jamais absolu, l'oculaire négatif peut encore avoir sous ce rapport quelque utilité. La figure 711 montre comment cet effet peut être produit. L'objet AB placé derrière l'objectif donnerait lieu, dans le cas où celui-ci n'est pas achromatique, à une série d'images colorées; $a_r\, b_r$ est l'image rouge et $a_u\, b_u$ l'image violette. Mais avant que les rayons se soient coupés pour former effectivement cette image, ils rencontrent la lentille O' qui rejette l'image rouge en $a'_r\, b'_r$ et l'image violette en $a'_u\, b'_u$. Or il résulte de la disposition des axes optiques que l'image violette est à la fois plus petite que l'image rouge et plus rapprochée de la lentille O''. On conçoit donc que celle-ci puisse



Fig. 711. — Oculaire négatif.

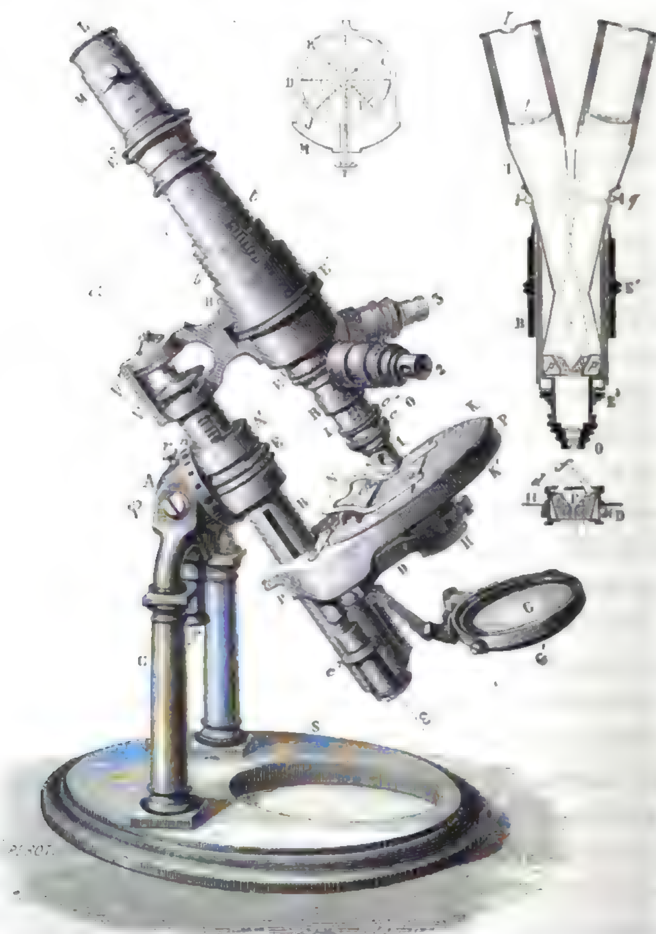


Fig. 712. — Microscope universel. — S, socle ; — A, pièce à rotation de 90° autour de l'axe γ ; — *f*, verrou d'arrêt ; — A', pièce à rotation d'un tour complet ; — *r*, verrou d'arrêt dans les ouvertures de la collerette *n* de la pièce A' ; — B, pièce pouvant monter et descendre dans A' par l'écrou E ; — T, tubes qui portent les oculaires et les objectifs ; — E^2, écran pour la mise au point du micromètre ; — R, revolver à deux calottes sphériques pour le changement des objectifs ; — E', écrou actionnant les vis guides *b* pour le mouvement rapide des tubes T ; — *e* et *e'*, écrous faisant mouvoir solidairement ou indépendamment les lentilles intérieures ; — G, ouvertures latérales pour l'éclairage des corps opaques ; — P, platine mobile ; — P', douille de la platine ; — V, vis donnant à la platine un mouvement rapide ; — V', vis donnant le mouvement lent ; — G, G', miroir concave et plan pour l'éclairement ; — D, porte-diaphragme ; — M, micromètre à ligne spirale ; — D, R, diamètres ; — J, vernier. — Le système binoculaire est représenté à part : O, objectif ; — P, prisme à double réflexion totale séparant en deux le faisceau objectif ; — *l*, lentille de champ ; — *l'*, oculaire ; — *q*, vis pour l'écartement des faisceaux.

être placée de telle façon que les deux images soient contenues dans l'angle qui a pour sommet le centre optique de O''. Dans ce cas, l'œil étant très-rapproché de la lentille, les diverses images seront projetées exactement les unes sur les autres, et il n'y aura pas de franges colorées. Cet oculaire a aussi l'avantage d'augmenter le champ de l'instrument.

Organes divers du microscope. — Indépendamment de la partie optique du microscope, il y a à considérer les divers organes servant à soutenir les lentilles, à disposer l'objet, à le mouvoir, l'éclairer, etc., organes qui ont au point de vue des recherches scientifiques une importance considérable.

Les différents constructeurs, MM. Nachet, Oberhauser, etc., ont varié, chacun à leur manière, les combinaisons relatives à ces parties accessoires de l'instrument. La figure 712 représente un modèle dû à M. Jaubert, dans lequel ces dispositions sont bien entendues; la légende placée au-dessous en donne une description suffisante. On voit à côté de la figure principale le mécanisme qui permet d'obtenir la vision binoculaire ou stéréoscopique; les rayons se divisent par la réflexion, sur deux prismes, en deux faisceaux dont chacun pénètre dans un tube particulier muni de son oculaire.

782. Lunette astronomique. — La lunette astronomique se compose essentiellement d'une lentille O dont l'ouverture est assez considérable et qui forme l'objectif. Les objets éloignés donnent lieu à une image renversée *ab* formée au foyer principal de l'objectif. Cette image est regardée à l'aide d'un oculaire O', qui en donne, à la distance de la vision distincte, une image virtuelle agrandie A'B'. Dans la figure, *1* et *2* représentent les rayons extrêmes du faisceau partant de la partie supérieure de l'objet (A), *3* et *4* les rayons extrêmes du faisceau partant de la partie inférieure (B). Ces deux faisceaux, après s'être réfractés dans

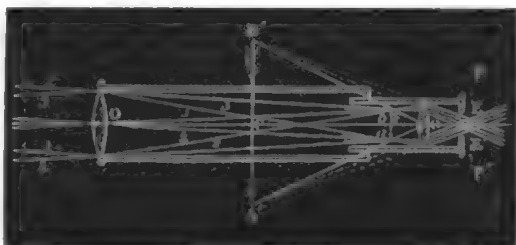


Fig. 713. — Lunette astronomique.

l'objectif, viennent concourir en a et b. De là ils forment deux faisceaux qui viennent tomber sur l'oculaire et vont se couper en EE' à une petite distance de l'oculaire lui-même.

Grossissement. — L'objet est vu directement sous l'angle aOb, et l'image sous-tend au centre optique de l'oculaire l'angle A'O'B; si donc on néglige la distance de l'œil à l'oculaire, le grossissement a pour expression le rapport $\frac{A'O'B'}{aOb}$, ou, ce qui est la même chose, $\frac{aO'b}{aOb}$. Or, comme ces angles sont toujours petits, ce rapport est à très-peu près égal au rapport des distances de ab à l'objectif et à l'oculaire. La première distance est exactement la distance focale F de l'objectif; la seconde est approximativement la distance focale de l'oculaire f; le grossissement est donc approximativement mesuré par l'expression très-simple $\frac{F}{f}$. On voit qu'il est d'autant plus grand que le foyer de l'objectif est plus long et celui de l'oculaire plus court.

Cette expression simple du grossissement suppose que l'oculaire est simple, c'est-à-dire qu'il est formé par un verre convexe unique; généralement il n'en est pas ainsi, et l'on emploie soit l'oculaire positif, soit l'oculaire négatif. Dans ce cas, l'expression du grossissement est beaucoup plus complexe et nous ne nous en occuperons pas ici. On peut du reste, par un procédé analogue à celui qui a été indiqué pour le microscope, mesurer le grossissement d'une manière directe.

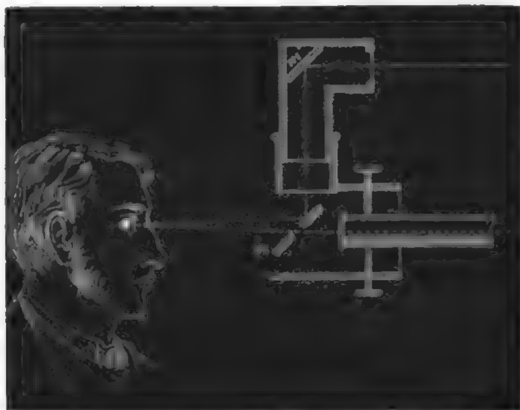


Fig. 714. — Mesure du grossissement d'une lunette.

On regarde dans la lunette avec l'un des yeux une mire éloi-

gnée, et avec l'autre œil on regarde la mire directement. On peut constater ainsi le nombre des divisions réelles contenues dans l'intervalle de deux divisions de l'image ; le rapport de ces nombres est précisément le grossissement. Lorsque la lunette est un peu forte, le corps de l'instrument empêche de regarder la mire avec le second œil ; dans ce cas, on adapte à l'instrument une espèce de chambre claire (fig. 714) comme dans le microscope. Les rayons venant directement de la mire sont réfléchis par le miroir m' et renvoyés à l'œil par le miroir percé m, placé au-devant de l'oculaire.

Disposition de l'instrument. — L'objectif achromatique est disposé dans une monture (fig. 715) qui se visse à l'extrémité d'un fort tube de cuivre AA. Dans ce tube glisse à frottement doux un second tube F à l'extrémité duquel se place l'oculaire. Dans le tube porte-oculaire se trouve ordinairement un réticule formé de deux fils croisés très-fins ; ce réticule est mobile et on en règle la position pour que, vu à travers l'oculaire, son image se fasse à la distance de la vision distincte. C'est dans cette même position que se trouve le diaphragme, et c'est là aussi que doit se former l'image réelle fournie par la lentille objective. On obtient ce résultat par un tirage que renferme le tube F, et on l'amène à être très-exact par un mouvement lent produit par la vis V qui agit sur tout le système porte-oculaire.

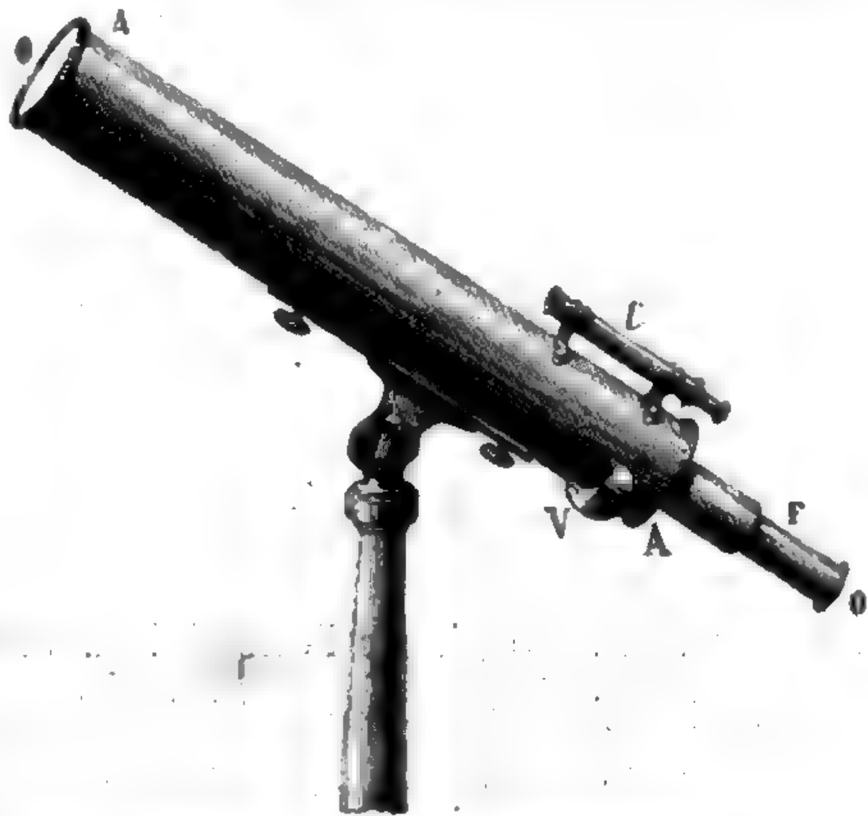


Fig. 715. — Lunette astronomique.

Chercheur. — On voit en l une petite lunette parallèle à la lunette principale, et qui est absolument indispensable quand le grossissement est un peu fort ; c'est ce qu'on appelle le *chercheur*. Pour en comprendre l'utilité, il faut remarquer que dans la lunette astronomique, comme dans le microscope, le champ est limité par

le cône qui, ayant pour sommet le centre de l'objectif, s'appuierait sur le contour de l'oculaire ou plutôt sur le diaphragme. Il en résulte nécessairement que, lorsque le grossissement est très-fort, le champ est très-petit, et il devient très-difficile d'amener dans la ligne de visée de l'instrument l'objet que l'on veut regarder. C'est pour cela qu'on emploie un chercheur, qui est une petite lunette munie d'un réticule. Le champ de cette lunette étant fort grand, il est facile de trouver le point que l'on veut observer et de l'amener au centre du réticule. D'après le parallélisme des lignes de visée qui a dû être l'objet d'un réglage antérieur, il se trouve par cela même au centre du réticule de la lunette principale.

Anneau oculaire. — On appelle anneau oculaire l'image de la surface de l'objectif donnée par l'oculaire. On l'observe facilement en dévissant l'objectif, dirigeant le tube vers la lumière des nuées et plaçant un petit écran au delà de l'oculaire ; on trouve un endroit où se forme nettement un petit cercle blanc ; c'est précisément l'anneau oculaire. Il est évident qu'un rayon quelconque qui a traversé l'objectif doit passer par l'anneau oculaire ; cet anneau est situé en EE', à l'endroit où se croisent les faisceaux qui ont donné l'image réelle ; c'est donc en ce point qu'il convient de placer l'œil si l'on veut qu'il profite de tous les rayons et qu'il embrasse la totalité du champ de l'instrument. A cet effet, le tube porte-oculaire se prolonge au delà du dernier verre et est formé par une plaque percée d'un trou (*œilleton*) correspondant exactement à l'anneau oculaire; c'est contre ce trou qu'on applique exactement l'œil.

Lorsque la lunette est ajustée pour voir les objets éloignés, le tirage a très-approximativement pour longueur $F + f$. Si dans ces conditions on mesure la distance a de l'anneau oculaire à la surface extérieure de l'oculaire lui-même, le quotient de la longueur de l'instrument par a donne approximativement le grossissement. En effet, $F + f$ et a sont pour la lentille oculaire des longueurs satisfaisant à la formule des foyers conjugués ; on a donc $\frac{1}{F+f} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f}$, formule de laquelle on déduit $\frac{F+f}{a} = \frac{F}{f}$.

783. Lunette terrestre. — La lunette astronomique donne

des images renversées, ce qui est tout à fait sans inconvénient pour l'observation des astres ; mais l'inconvénient est au contraire très-grave quand il s'agit de la contemplation des objets terrestres. Pour transformer la lunette astronomique en lunette terrestre dans laquelle les images sont redressées, on ajoute au delà du point où se forme l'image réelle une petite pièce appelée véhicule, qui porte

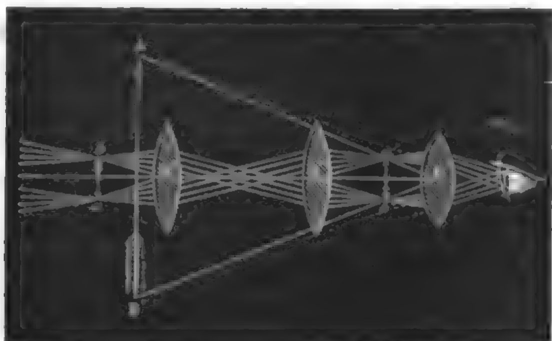


Fig 716. — Lunette terrestre.

deux lentilles O'' et O''' (fig. 716) de même distance focale. On voit par la figure que l'image *ab* est reportée en *a'b'* redressée, mais sans altération de grandeur. C'est au delà de *a'b'* qu'est placé l'oculaire O' qui fournit l'image virtuelle A'B'. On voit que la transformation de la lunette astronomique en lunette terrestre ne change pas le grossissement, mais elle diminue le champ et augmente la longueur de l'instrument de toute la distance qui sépare *ab* de *a'b'*.

784. Lunette de Galilée. — Dans les circonstances où l'on n'a pas besoin d'un fort grossissement, on peut se servir utilement de la lunette imaginée par Galilée, qui donne naturellement des images droites et avec une longueur qui, à grossissement égal, est beaucoup plus petite que celle de la lunette terrestre.

Dans la lunette de Galilée (fig. 717) il y a une lentille objective O et un oculaire négatif formé par une lentille concave O'. Les rayons *1* et *2*, formant les limites du faisceau aboutissant à l'extrémité supérieure de l'objet, viendraient donner en *a* l'image réelle de cette extrémité (A). De même le faisceau limité par les rayons *3* et *4* viendrait donner en *b* l'image réelle de la partie inférieure (B). Mais ces fais-

ceaux sont rencontrés par la lentille concave avant leur point de concours réel. L'image a est reportée en A' sur l'axe optique aO' et l'image b en B'. L'oculaire étant dans une position convenable, l'image virtuelle droite A'B' se fait à la distance de la vision distincte, c'est elle qui est perçue par l'œil.

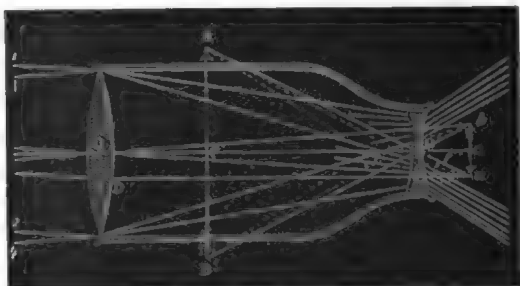


Fig. 717. — Lunette de Galilée.

Grossissement. — Pour apprécier le grossissement, nous négligerons la distance de l'œil à l'oculaire et nous remarquerons que l'image est vue sous l'angle A'O'B' ou son égal $aO'b$, tandis que l'objet est vu sous l'angle aOb. Le grossissement est donc égal à $\frac{a\,O'\,b}{a\,O\,b}$. Comme ces angles sont petits, ce rapport est approximativement égal au rapport de la distance de ab à l'objectif et à l'oculaire. La distance de ab à l'objectif est précisément la distance focale F de l'objectif lui-même; quant à la distance de ab à l'oculaire, nous allons démontrer qu'elle est à peu près égale à la distance focale f de l'oculaire; le grossissement a donc, comme dans la lunette astronomique, pour expression $\frac{F}{f}$. Remarquons toutefois cette différence que la longueur de la lunette astronomique ajustée est égale à $F + f$, tandis que celle de la lunette de Galilée est $F - f$.

Distance à laquelle il faut placer l'oculaire. — Cherchons la distance x à l'image réelle ab où l'on doit placer l'oculaire pour que l'image se fasse à la distance de la vision distincte. A cet effet remarquons que les rayons étant convergents sur l'oculaire, la distance p de l'objet doit être négative; l'image A'B' étant virtuelle, p' doit être aussi négatif, et, comme dans le cas des lentilles concaves le terme $\frac{1}{f}$ est également négatif, il s'ensuit que les trois termes de la formule des foyers sont négatifs; on a donc en changeant tous les signes

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{D} = \frac{1}{f},$$

d'où

$$x = \frac{Df}{D-f} = \frac{f}{1-\frac{f}{D}}.$$

On voit que si l'on néglige f devant D, x se réduit à f, ainsi que nous l'avons indiqué précédemment. La formule montre en outre que quand D diminue, x augmente, c'est-à-dire que l'oculaire doit être rapproché de l'objectif. La lunette doit donc être raccourcie d'autant plus que la distance de la vision distincte est plus courte.

Lunette de spectacle. — C'est la lunette de Galilée que l'on emploie comme lunette de spectacle. Dans les instruments de ce genre soigneusement construits, l'objectif et l'oculaire sont achromatiques. L'objectif est formé par une lentille concave en flint, comprise entre deux lentilles convexes en crown. L'oculaire se compose au contraire d'une lentille convexe en flint, comprise entre deux lentilles concaves de crown. Ordinairement on associe deux lunettes de manière à pouvoir regarder avec les deux yeux ; les tirages des deux instruments sont mis en mouvement d'une façon simultanée par un mécanisme unique. L'appareil prend alors le nom de *jumelle*.



Fig. 718. — Lunette de spectacle.

785. Télescopes. — Télescope de Newton. — Les télescopes diffèrent des lunettes en ce que l'image objective est formée par un miroir, au lieu de l'être par une lentille. Cette image est regardée à l'aide d'un oculaire simple ou composé à la manière ordinaire. Nous décrirons seulement ici le télescope de Newton, qui est du reste le plus employé, au moins quand il s'agit d'observations astronomiques.

L'objectif est un miroir concave (fig. 719) placé au fond d'un tube que l'on dirige vers les objets éloignés. Les rayons *1* et *2* d'une part, *3* et *4* de l'autre, qui limitent les faisceaux supérieur et inférieur, viendraient donner en ab, au foyer F du miroir, l'image renversée de l'objet. Mais avant leur point de concours ils rencontrent le miroir plan M qui rejette l'image en $a'b'$, les points a' et b' étant, par rap-

port au miroir M, les symétriques de a et b. L'oculaire O′ transforme cette image en une image virtuelle agrandie A′B′.

Grossissement. — Le grossissement s'exprime d'une manière approchée par la même expression que dans la lunette astronomique et la lunette de Galilée. En effet, l'image ab soutiendrait, au centre du miroir (O) que l'on ne voit pas sur la figure, un angle aOb, qui est précisément celui sous lequel l'objet est vu directement; $a'b'$ qui lui est égale sous-tend en O′ un angle égal $a'O'B'$ à celui sous lequel est vue précisément l'image; le grossissement est donc égal à $\frac{a'O'b'}{aOb}$ ou, ce qui est la même chose sensiblement, au rapport de la distance de ab au centre, à la distance de $a'b'$ à l'oculaire. La première distance est la distance focale F du miroir; la seconde est à peu près la distance focale f de l'oculaire supposé simple. Le grossissement est donc égal à $\frac{F}{f}$.



Fig. 719. — Télescope de Newton.

Le télescope de Newton est monté sur un pied à la manière des lunettes et muni d'un chercheur. La présence de l'oculaire à l'extrémité supérieure du tube n'est pas extrêmement commode, et, à cause de cela, on se sert quelquefois du télescope de Gregory. Dans cet instrument, dont nous croyons inutile de donner la description détaillée, le miroir objectif est percé en son centre; les rayons, ramenés par un petit miroir concave placé dans l'axe de l'instrument, viennent former l'image réelle près de l'ouverture du grand miroir; c'est dans cette ouverture qu'on place le tube porte-oculaire. Le télescope présente ainsi la forme générale des lunettes, c'est-à-dire qu'on regarde dans le sens même de l'axe du tube.

786. Télescopes à miroir argenté. — Travaux de M. Foucault. — Les télescopes, comparés aux lentilles achromatiques, présentent

des inconvénients graves qui les avaient fait délaisser presque complétement, à partir du moment où l'on a su fabriquer du flint assez pur pour les objectifs achromatiques.

D'une part, le métal des miroirs, qui est une espèce de bronze, tout en ayant une rigidité spéciale et supérieure à celle des métaux élémentaires qu'on pourrait employer, n'est pas toutefois tellement rigide qu'il ne soit nécessaire de lui donner une épaisseur considérable pour prévenir les flexions; cette épaisseur doit même s'accroître beaucoup quand les dimensions du miroir deviennent un peu grandes, et dès lors, par suite de la forte densité de l'alliage, le poids du miroir devient énorme. En second lieu, le pouvoir réflecteur du métal des miroirs n'est pas très-considérable, et, à grossissement égal, les images obtenues par un réfracteur sont beaucoup plus lumineuses que celles que fournit un télescope. Enfin le défaut le plus grave tient à l'altération progressive du poli de la surface par l'action de l'air. A mesure que ce poli diminue, la clarté de l'instrument diminue avec lui, et au bout d'un certain temps il faut procéder à un polissage nouveau. Mais ce travail doit être dirigé de façon à ne pas compromettre la forme curviligne, sphérique ou parabolique du miroir; il constitue donc un travail tout à fait équivalent au travail primitif, travail difficile, délicat, et qui doit être répété autant de fois que l'altération du poli l'exige. Malgré ces inconvénients, les télescopes ont été et sont encore employés, quand on veut avoir de très-grands grossissements, dans le but de pouvoir observer les détails des objets célestes, dans les études d'astronomie physique. C'est qu'en effet, si la construction de très-grands miroirs, grossissant plusieurs milliers de fois, comme ceux de W. Herschel ou de lord Ross, est une opération extrêmement difficile, elle n'est pas en définitive irréalisable, tandis que la fabrication d'objectifs d'un diamètre supérieur à 75 ou 80 centimètres présente des difficultés absolument insurmontables.

Vers 1859, M. Foucault en France et M. Steinheil à Munich proposèrent dans la construction des miroirs de télescopes une modification qui constitue une révolution véritable, et qui permet de substituer avantageusement les télescopes aux réfracteurs, dans tous les cas et quel que soit le grossissement. Elle consiste à em-

ployer des miroirs en verre argenté. Le verre, plus rigide que l'alliage des miroirs et d'une densité presque quatre fois plus faible, fournit des miroirs d'un poids beaucoup moindre. L'argent poli, déposé sur sa surface, possède un pouvoir réflecteur extrêmement considérable et qu'on peut évaluer à 95 ou 96 pour 100 [1]. Enfin, et c'est le point le plus essentiel, si on a travaillé la surface du verre de manière à lui donner toute la rectitude possible, ce travail se trouve définitif, car lorsque la pellicule d'argent se ternit, il suffit de l'enlever et de la remplacer par une autre, et cela autant de fois qu'on le jugera nécessaire.

Quant au travail de la surface du verre, M. Foucault a fait connaître une méthode d'exploration rationnelle et de retouches locales qui permet d'amener, à coup sûr, un miroir approximativement travaillé par les méthodes ordinaires d'atelier à une forme strictement parabolique. La description de cette méthode, aussi précise qu'originale, excéderait les limites d'un traité élémentaire. Le lecteur la trouvera détaillée dans le tome V des *Annales de l'Observatoire*.

1. M. Foucault se servait, pour argenter le miroir, du procédé Drayton, dont l'emploi est assez délicat. M. Adolphe Martin, collaborateur de M. Foucault, a fait connaître un procédé d'une exécution beaucoup plus sûre et plus prompte. L'auteur en a donné la description détaillée dans le tome XV (4e série) des *Annales de physique et de chimie*.

FIN.

PROBLÈMES

I. PESANTEUR.

1. Deux mobiles sont successivement lancés de bas en haut avec une vitesse égale à 100 mètres. Quel est l'intervalle de temps qui doit séparer les époques de leur départ pour que le second se meuve $8^{sec},7$ avant de rencontrer le premier?

2. Dans une machine d'Atwood les poids suspendus aux deux extrémités du fil sont chacun égaux à 100^{gr}; on demande ce que doit peser la masse additionnelle pour que l'espace parcouru pendant les deux premières secondes de la chute soit de 4 décimètres.

3. Un corps est lancé horizontalement du sommet d'une tour de 100 mètres de hauteur avec une vitesse de 30 mètres par seconde. On demande au bout de quel temps et à quelle distance de la tour il atteindra le sol.

4. Deux corps sont abandonnés à l'action de la pesanteur à $\frac{1}{5}$ de seconde l'un de l'autre sur la même verticale. Au bout de combien de temps seront-ils séparés par une distance de 1 mètre?

5. On laisse tomber une pierre à l'orifice d'un puits, et entre le moment où on l'abandonne et celui où l'on entend le bruit de sa chute on compte 2 secondes. On demande la profondeur du puits.

6. Étant donné un bâton droit, terminé à l'une de ses extrémités par une masse de plomb, on sait qu'il est plus facile de le maintenir en équilibre sur le doigt lorsque le plomb est à la partie supérieure que quand il est à la partie inférieure. Expliquer ce phénomène.

7. On enlève dans l'intérieur d'une sphère de 1 décimètre de rayon une portion sphérique dont le centre est à 5 centimètres du centre de la grande sphère. Trouver la position du centre de gravité du solide restant.

8. Deux petites sphères, l'une de plomb pesant 100 grammes, l'autre d'ivoire pesant 25 grammes, sont liées l'une à l'autre par un fil de $0^{m},75$ centimètres de longueur, et enfilées sur la tringle de l'appareil à force centrifuge; on demande de trouver la position d'équilibre du système.

9. Un guéridon circulaire est porté par un pied unique situé vers le centre. En quels points de la circonférence faut-il placer trois poids de 4, 5 et 6 kilogrammes pour que la pression qui en résulte passe par le centre ?

10. On a un ballon plein d'air sous la pression indiquée par le baromètre ; on y fait le vide ou plutôt on réduit l'élasticité à être seulement x ; on y fait entrer de l'hydrogène pour rétablir la pression barométrique ; on réduit de nouveau l'élasticité du mélange au même point x, et on fait de nouveau rentrer l'hydrogène pour rétablir la pression. Il arrive après cette dernière opération que le ballon contient un mélange dans lequel le poids de l'air est $\frac{1}{1000}$ du poids de l'hydrogène. On demande quelle est la valeur de x. La température est constante, la pression 750 millimètres ; densité de l'hydrogène 0,0692.

11. Un morceau de fer plongé dans un vase plein d'eau en fait sortir 10 grammes. Mis dans un vase plein de mercure, il y flotte en déplaçant 78 grammes de mercure. On demande le poids, le volume et la densité du morceau de fer.

12. On a un cylindre d'acier de 22 centimètres de longueur qu'on voudrait lester avec un cylindre de platine de même diamètre ; quelle longueur faut-il donner au cylindre de platine ? Densité de l'acier, 7,5 ; densité du platine, 22,5.

13. On mélange deux liquides ; le volume total est 3 litres avec une densité égale à 0,9. Le premier liquide a pour densité 1,3 ; le second, 0,7. Quels sont leurs volumes respectifs ?

14. Dans un tube recourbé, à deux branches verticales, l'eau s'élève à la même hauteur. Les deux branches ont des sections inégales, l'une a 1 centimètre, l'autre 10 centimètres. Au-dessus du liquide, dans la branche large, on place un piston du poids de 5 kilogrammes. En vertu de la pression qu'il exerce, le liquide s'élève dans la petite branche, au-dessus de son niveau primitif, à une hauteur qu'on propose de déterminer.

15. Un tronc de cône de liége de 1 décimètre de hauteur et dont les rayons de base sont 2 décimètres et 1 décimètre flotte librement dans l'eau, son axe étant vertical. On demande de trouver la hauteur d'affleurement du liquide. Densité du liége, 0,24.

16. Quel volume de platine faut-il associer à un litre de fer pour que le système flotte librement dans le mercure ?

17. Quelle devrait être l'épaisseur d'une sphère creuse de platine de 1 décimètre de rayon pour que la sphère vide flotte librement dans l'intérieur de l'eau ?

18. Une sphère en liége de 3 centimètres de rayon est lestée avec une sphère d'or; on demande quel doit être le rayon de cette dernière pour que le système flotte librement dans l'alcool.

19. Un alliage d'or et d'argent a pour densité D; la densité de l'or est d, celle de l'argent d'. Quel est le poids de chacun des métaux qui entrent dans l'alliage, en supposant que dans la formation de celui-ci il n'y ait eu ni contraction ni dilatation ?

20. Connaissant le poids d'un corps dans l'air et dans l'eau au maximum de densité, trouver quel serait le poids de ce corps dans le vide.

21. Un cylindre vertical de 1 décimètre de diamètre et de 3 décimètres de hauteur communique par sa partie inférieure avec un tube de 1 centimètre de diamètre qui se recourbe et s'élève verticalement à une hauteur suffisante. Ce tube est ouvert à sa partie supérieure. Le cylindre est fermé, et il contient un volume égal d'air et de mercure. L'air s'y trouve sous la pression atmosphérique, de telle sorte que le mercure est au même niveau dans le cylindre et dans le tube. Avec une pompe de compression on introduit de l'air dans le cylindre jusqu'à ce que le niveau du mercure se soit abaissé de 10 centimètres dans le cylindre. Quel est le poids de l'air introduit ?

22. Un manomètre à air libre formé d'un tube de fer recourbé, dont les deux branches sont parallèles et verticales, et d'un tube de verre plus large que le tube de fer, renferme du mercure jusqu'au niveau du tube de verre, et à la même hauteur, dans les deux branches. Quel doit être le rapport des sections du tube de verre et du tube de fer pour que le mercure monte de $0^m,50$ pour une pression de 6 atmosphères exercée dans la branche opposée ?

23. Un récipient A de 3 litres de capacité peut être mis en communication avec une pompe foulante P et avec l'air extérieur. La soupape R ouvre la première communication et le robinet R' la seconde. Le récipient A est primitivement plein d'air sec à zéro et à $0^m,760$. La pompe P puise dans un gazomètre de l'acide carbonique à la pression constante de $0^m,760$ et à la température de zéro, et elle peut l'injecter en A; lorsque R s'ouvre, le corps de pompe a une capacité de 2 litres.

Cela posé, on ferme R'; on donne un premier coup de piston, et quand le mélange gazeux est bien achevé, on ouvre R' pendant un instant, de manière que l'équilibre de pression se rétablisse entre A et l'air extérieur. Cela fait, on ferme R'; on donne un second coup de piston, et ainsi de suite, en prenant soin chaque fois de rouvrir le robinet R' pendant un instant. On demande combien il faut donner de coups de piston pour qu'il ne reste plus que 1 centigramme d'air dans le récipient A. On suppose que la pression extérieure se maintient constante et égale à $0^m,760$.

(*Concours général de 1860.*)

24. On prend un tube de verre bien cylindrique de 1 mètre de long, dont la section intérieure est de 1 centimètre carré; la section extérieure est de 2 centimètres carrés, en sorte que la section du verre soit de 1 centimètre carré.

Le tube étant supposé fermé à l'une de ses extrémités par un fond plat sans épaisseur et sans poids, on remplit ce tube de mercure, on le renverse sur une cuve profonde, on y introduit 10 centimètres cubes d'air à la pression, à la température ambiante, et on l'abandonne à lui-même dans une position verticale.

On demande quel sera le volume de l'air intérieur; quelle sera la différence de niveau à l'intérieur et à l'extérieur. — Densité du verre, 2,49; pression extérieure, 0,760. *(Concours général de 1866.)*

25. Sachant que la densité de la dissolution formée de 85 parties d'eau et de 15 de sel qui sert à graduer le pèse-acide de Baumé est 1,116, démontrer la formule $D = \frac{144}{144 - N}$ qui donne la densité du liquide en fonction du point d'affleurement.

26. Dans la graduation du pèse-liqueur on se sert d'une dissolution de 90 parties d'eau et 10 de sel dont la densité est 1,084. En déduire la formule $D = \frac{129}{119 + N}$.

27. Trouver à 1 millimètre près le côté du tétraèdre régulier d'or monétaire valant 1,000 francs. — Densité de l'or, 18.

28. Dans un baromètre à siphon on a observé une pression de 750 millimètres; on a ajouté ensuite du mercure dans la branche ouverte de façon à réduire la chambre barométrique à sa moitié, et on trouve une différence de niveau nouvelle et égale à 740 millimètres. — Déduire de là la valeur exacte de la pression extérieure.

29. On plonge une éprouvette cylindrique de 1 décimètre de hauteur dans le mercure, l'ouverture en bas. — On demande de combien il faudra l'enfoncer pour que le volume de l'air intérieur soit réduit à sa moitié.

30. Dans une machine pneumatique dont le récipient est égal à 1 litre on trouve qu'après trois coups de piston la force élastique est réduite de 0,760 à 0,315. On répète la même expérience en plaçant dans le récipient un certain corps, et on trouve qu'au bout du même nombre de coups de piston la pression initiale 0,760 est réduite à 0,200. — On propose de déduire de là le volume du corps.

31. Une éprouvette cylindrique de 1 décimètre de hauteur et de 2 décimètres de diamètre flotte librement dans l'eau, l'extrémité ouverte en bas; sa partie supérieure arrive au niveau de la surface du liquide.

— On demande à quelle hauteur l'eau s'élève dans son intérieur. — Pression extérieure, 0,760 ; épaisseur de l'éprouvette, 1 millimètre.

32. Une éprouvette flotte, la partie ouverte en bas, dans l'eau. Pour faire arriver sa partie supérieure au niveau de la surface liquide, il faut la charger d'un poids qui, ajouté au poids de l'éprouvette, forme un total égal à P. On répète l'expérience en plongeant la partie fermée de l'éprouvette dans le liquide, et le poids nécessaire pour produire l'affleurement est, en comprenant le poids de l'éprouvette, Q. — Déduire de là la pression atmosphérique.

33. Un cylindre de bois de 1 décimètre de hauteur et d'une densité égale à 0,96 flotte verticalement dans l'eau. Le vase est placé dans un récipient où l'on peut comprimer de l'air à 40 atmosphères. — Chercher la variation produite par cette pression dans la position du cylindre.

II. CHALEUR.

34. Un vase exactement conique contient une certaine quantité de mercure à zéro. — A quelle température faut-il porter cet appareil pour que la profondeur augmente de $\frac{1}{189}$ de ce qu'elle est? (*Concours général de 1855*).

35. Quelle est la température qui est désignée par le même nombre dans l'échelle centigrade et dans l'échelle Fahrenheit? — Y en a-t-il plusieurs qui présentent ce caractère?

36. Un pendule compensateur de Graham est formé d'une tige de fer de longueur l à zéro, supportant un vase cylindrique de verre de hauteur h et de rayon r, à la même température. — Déterminer la hauteur x du mercure qu'il convient de mettre à zéro pour que la compensation soit établie. On supposera que le centre de gravité se trouve au milieu de l'axe de la colonne de mercure, et que c'est ce point qui doit rester dans une position invariable.

37. Dans un tube cylindrique divisé en parties d'égale capacité se trouve du mercure et du platine dans son intérieur. Le niveau du liquide arrive à un certain point. On chauffe, et ce niveau se maintient invariable. — En déduire le rapport des poids du mercure et du platine.

38. Un tube de verre fermé par un bout, effilé par l'autre, a été rempli d'air sec et porté à une température x sous la pression de l'atmosphère ; puis il a été fermé hermétiquement. Quand le tube a été refroidi à la température de 100°, on l'a renversé verticalement, la pointe en bas,

dans un bain de mercure, et on a brisé la pointe; le mercure s'est élevé dans le tube à 19 centimètres, la pression extérieure étant toujours 76 centimètres, comme au commencement de l'expérience. Le tube est redressé et pesé avec le mercure qu'il contient; on constate qu'il contient un poids de 200 grammes de mercure. Entièrement plein de mercure il en renferme 300 grammes. — Déduire de là la température x.

(Paris, 22 juillet 1868.)

39. Un tube de verre ayant à l'intérieur la forme d'un cylindre droit à base circulaire a un diamètre intérieur de 2 millimètres à zéro et renferme une colonne de mercure dont la longueur à cette température est de 2 décimètres. — On demande quelle serait à la température de 80° la nouvelle longueur de la colonne de mercure. — Coefficient de dilatation du mercure $\frac{1}{5550}$. — Coefficient de dilatation cubique du verre, $\frac{1}{3870}$.

40. Un ballon fermé dont le volume extérieur est 10 litres à zéro se trouve plongé dans l'air à 15° et sous la pression de 0,77 de mercure. — On demande : 1° quelle perte du poids il éprouve par suite de l'action de l'air; 2° quelle variation subirait cette perte de poids si la pression devenait 0,768 et la température 17°.

41. On a renfermé de l'air sec dans un tube thermométrique horizontal à l'aide d'un index de mercure. A la température de zéro et à 0,760 de pression l'air occupe 720 divisions du tube divisé en parties d'égale capacité. A une température et à une pression inconnues ce même air occupe 960 divisions. Le tube ayant été mis dans la glace fondante, sous cette dernière pression l'air n'y occupe que 750 divisions. — On demande la température et la pression.

42. A quelle température l'oxygène, sous la pression de 20 centimètres, aurait-il la même densité que l'hydrogène à zéro sous la pression de 160 centimètres ?

43. Quel est à zéro le volume intérieur d'une ampoule de verre qui à 25° est exactement remplie par 53 grammes de mercure ?

44. Un baromètre a été observé à deux époques différentes et a donné 770 millimètres à 85° et 760 millimètres à 5°. — On demande le rapport entre les deux hauteurs corrigées.

45. Le poids spécifique du cuivre à zéro est 8,8; son coefficient de dilatation linéaire est $\frac{1}{58100}$. On demande quelle sera à 30° la longueur d'un paquet de fils de ce métal pesant 15 kilogrammes, et ayant à 10° une section de 4 millimètres carrés.

46. La pression atmosphérique ayant varié de 713 millimètres à 781 millimètres, et la température de $-19°$ à $+36°$, quelle est d'après cela la variation du poids apparent de 1 kilogramme de laiton, la densité normale de l'air étant les 0,000154 de celle du laiton ?

47. Un tube de verre creux cylindrique est divisé en 300 parties égales. Il est lesté avec du mercure de façon que dans l'eau à 10° il s'enfonce jusqu'à la 50e division. — On demande quelle sera sur l'échelle la position du point d'affleurement dans l'eau à 50°. Les volumes occupés par un même poids d'eau à 10° et à 50° sont entre eux comme 1,000268 et 1,01205.

48. Trouver la valeur du coefficient de dilatation de l'air en prenant pour origine des températures le zéro Fahrenheit et pour intervalle de température le degré de la même échelle.

49. A quelle pression devrait-on amener de l'air à 15° pour que sa densité fût la même que celle de l'hydrogène à zéro et 760 millimètres ? — Densité de l'hydrogène, 0,0692.

50. A quelle température un litre d'air sec et sous la pression de 760 millimètres pèse-t-il 1 gramme ?

51. Dans un mètre cube d'air à 20° on a trouvé 11gr.,56 de vapeur d'eau. — Quel est le degré d'humidité de cet air ?

52. Calculer le poids de 15 litres d'air saturé de vapeur d'eau à la température de 20° sous la pression de 750 millimètres. — La tension maxima de la vapeur à 20° est 17mm,39.

(Paris 24 juillet 1868.)

53. On a un tube recourbé se terminant à l'une de ses extrémités par une boule. Une colonne de mercure s'élève à la même hauteur dans les deux branches et sépare ainsi deux masses d'air à la même pression. Celle qui est dans la boule est saturée d'humidité, l'autre est formée d'air parfaitement sec. On connaît la longueur occupée par celui-ci, ainsi que la pression initiale à zéro. Cela posé, on porte l'appareil à la température de 100° et on propose de calculer le déplacement de la colonne liquide.

On supposera qu'il y a assez d'eau du côté de la boule pour que l'air reste toujours saturé. On peut, en outre, à raison du volume relativement considérable de la boule, supposer que l'air humide conserve le même volume.

54. Un litre d'alcool mesuré à zéro, chauffé dans un vase de laiton du poids de 100 grammes, placé dans un kilogramme d'eau à 10° contenu dans un vase de laiton du poids de 200 grammes, a élevé de 10° à 27°

la température de cette eau. — Quelle est la chaleur spécifique de l'alcool ?

La densité de l'alcool est 0,8. — La chaleur spécifique du laiton est 0,1.

55. Un vase de cuivre du poids de 1 kilogr. contient 2 kilogr. d'eau, et dans l'eau plonge en totalité un thermomètre dont le mercure pèse 200 grammes et le verre 100 grammes. Tous ces corps sont à la même température 0°. On fait arriver dans le vase 100 grammes de vapeur d'eau à 100° qui se condensent. On suppose qu'il n'y a pas de perte de chaleur à l'extérieur, et on demande quelle sera la température après la condensation lorsque le cuivre, l'eau, le verre et le mercure auront pris leur état d'équilibre.

La capacité de mercure est 0,033, celle du cuivre 0,095, celle du verre 0,177.

(*Concours général de 1843.*)

III. ACOUSTIQUE ET OPTIQUE.

56. Le poids spécifique du platine étant pris égal à 22, celui du fer à 7,8, on demande quel rapport il doit y avoir entre les longueurs de deux fils, l'un en platine et l'autre en fer, tous les deux de même section, pour qu'ils soient à l'unisson quand ils sont également tendus.

57. Deux cordes de même longueur et de même section sont formées de matières ayant des poids spécifiques différents d et d' ; chacune de ces cordes est tendue par un poids égal à son propre poids. — Quel est le rapport musical des sons qu'elles peuvent rendre ?

58. Un tuyau donnait un son de 100 vibrations par seconde à la température de 10°. — Quelle devrait être la température de l'air pour que le son rendu fût à la quinte majeure du premier ?

59. Quelle doit être au moins la hauteur d'un miroir plan pour qu'un objet vertical placé au-devant puisse y être aperçu dans toute sa hauteur ?

60. La flamme d'une bougie étant placée sur l'axe d'un miroir sphérique concave à une distance de $1^{m},54$, son image se forme à $0^{m},45$ du miroir. — Quel est le rayon de courbure de ce miroir ?

61. Sur l'axe d'un miroir sphérique concave de 1 mètre de rayon on a placé un objet de 9 centimètres de hauteur à une distance de 2 mètres. — Trouver la grandeur et la position de l'image.

62. Quelle est la dimension de l'image circulaire du soleil qui se forme au foyer principal d'un miroir de 20 mètres de rayon? — Le diamètre apparent du soleil est de 30 minutes.

63. Devant un miroir sphérique concave de 2 mètres de rayon on place une flèche lumineuse concave de 1 décimètre de longueur perpendiculairement à l'axe principal et à 5 mètres du miroir. — Quelles sont la position et la grandeur de l'image?

On place ensuite un petit miroir plan réflecteur au foyer principal du miroir sphérique, incliné de 45° sur l'axe principal et la face polie tournée vers le miroir. — Quelle sera la nouvelle position de l'image?

64. On fait tomber un faisceau de rayons parallèles sur une sphère de verre de 1 mètre de rayon. — Trouver le foyer principal des rayons voisins de l'axe. — L'indice de réfraction du verre est 1,5.

65. Quelle est la distance focale d'une lentille biconvexe de diamant de 4 millimètres de rayon pour chacune des faces? — Indice de réfraction, 2,487.

66. Un objet de 8 centimètres de hauteur est placé sur l'axe d'une lentille de crown-glass ordinaire de 0,4 de rayon à un mètre de distance. — Trouver la grandeur et la position de l'image.

67. Quel est le rapport du grossissement d'une loupe de diamant à une lentille de verre de même foyer? — Indice du verre, 1,5; indice du diamant, 2,481.

68. Un télescope (télescope de Gregory) est construit de la manière suivante : Les rayons lumineux, réfléchis par le miroir objectif, viennent former au foyer une image réelle. Continuant leur chemin, ils rencontrent un petit miroir concave qui en donne une nouvelle image renversée par rapport à la première, et droite, par conséquent, par rapport à l'objet. Celle-ci est regardée par un oculaire placé dans un tube qui reçoit une ouverture percée dans l'objectif. — Quel est le grossissement de ce télescope?

69. Deux lentilles convergentes de 0,05 de foyer sont séparées l'une de l'autre par un intervalle de 0,03, et montées d'ailleurs de telle manière que leurs axes coïncident. — Quelle image ce système donnera-t-il d'un cercle de 0,01 de diamètre placé successivement à diverses distances en dehors de l'intervalle des deux lentilles?

(*Concours général de 1863.*)

70. A une lentille convexe dont la distance focale est f on accole une lentille concave de foyer f'. — Quelle est la distance focale principale du système?

71. L'arbre d'une sirène acoustique porte un miroir plan, mince, poli sur ses deux faces et parallèle à l'axe de l'arbre. La sirène rend un son caractérisé par 690 vibrations par seconde. Le plateau mobile est percé de 15 trous. Une source de lumière fixe envoie sur le miroir un faisceau de rayons parallèles horizontaux dirigés vers l'axe de rotation. — On demande quel chemin parcourt en une minute un point du faisceau réfléchi situé à 4 mètres de l'axe de la sirène. Cet axe est supposé vertical.

(*Concours général de 1860.*)

72. Une lampe et une bougie sont distantes l'une de l'autre de $4^{m},15$, et on sait que les intensités des deux lumières sont entre elles comme 6 est à 1. — A quelle distance de la lampe, sur la ligne droite qui joint les deux lumières, doit-on placer un écran pour qu'il soit également éclairé par l'une et par l'autre ?

73. Un rayon lumineux tombe perpendiculairement sur la surface d'un prisme de verre équilatéral dont l'angle réfringent est de 60°. — Quelle sera la déviation du rayon après l'action du prisme ? — Indice du verre, 1,5.

74. Quelle est la longueur du cône d'ombre portée par la terre, et quel est le diamètre de la section faite dans ce cône à une distance de la terre égale à celle de la lune ?

Le rayon du soleil égale 112 rayons terrestres ; la distance de la lune à la terre, 60 rayons terrestres ; celle du soleil à la terre, 24,000 rayons terrestres.

On ne tiendra pas compte de la réfraction atmosphérique.

75. Une sphère de verre posée sur un plan horizontal reçoit les rayons solaires. — Quelle doit être la hauteur x du soleil au-dessus de l'horizon pour que le foyer principal de la sphère soit sur le plan qui la soutient ?

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE XVI. — POUSSÉE DE L'AIR.

CHAPITRE XVII. — DES POMPES.

CHAPITRE XVIII. — RÈGLE DE TORRICELLI.

CHALEUR.

CHAPITRE XIX. — THERMOMÈTRE.

CHAPITRE XX. — FORMULES DE DILATATION.

CHAPITRE XXI. — DILATATION DES SOLIDES.

CHAPITRE XXII. — DILATATION DES LIQUIDES.

CHAPITRE XXIII. — DILATATION DES GAZ.

CHAPITRE XXIV. — FUSION ET SOLIDIFICATION.

CHAPITRE XXV. — ÉVAPORATION.

CHAPITRE XXVI. — ÉBULLITION.

CHAPITRE XXVII. — MESURE DE LA TENSION MAXIMA DES VAPEURS.

CHAPITRE XXVIII. — HYGROMÉTRIE.

CHAPITRE XXIX. — CHALEUR RAYONNANTE.

CHAPITRE XXX. — CONDUCTIBILITÉ.

CHAPITRE XXXI. — CALORIMÉTRIE.

CHAPITRE XXXII. — THÉORIE MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

CHAPITRE XXXIII. — MACHINES THERMIQUES.

CHAPITRE XXXIV. — TEMPÉRATURES TERRESTRES.

ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE XXXV. — PREMIERS PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE XXXVI. — ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE.

CHAPITRE XXXVII. — MESURE DES FORCES ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE XXXVIII. — MACHINES ÉLECTRIQUES.

CHAPITRE XXXIX. — EXPÉRIENCES DIVERSES AVEC LA MACHINE ÉLECTRIQUE.

CHAPITRE XL. — CONDENSATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE XLIX. — EFFETS CALORIFIQUES PRODUITS PAR LES COURANTS.

CHAPITRE L. — MACHINES ÉLECTROMOTRICES. — TÉLÉGRAPHES.

CHAPITRE LI. — ÉLECTRO-CHIMIE.

CHAPITRE LII. — INDUCTION.

ACOUSTIQUE.

CHAPITRE LII. — PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON.

CHAPITRE LIV. — ÉVALUATION NUMÉRIQUE DES SONS.

CHAPITRE LV. — LOIS DES VIBRATIONS.

OPTIQUE.

PARIS — J. CLAYE, IMPRIMEUR, 7, RUE SAINT-BENOIT. — [1399]

PARIS. — J. CLAYE, IMPRIMEUR, 7, RUE SAINT-BENOIT. — [327]


RAFFAELLO DEL MEGLIO
LEGATORE DI LIBRI
Piazza della Signoria
FIRENZE N°40



